

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DE ACEROS **INÓXIDABLES AUSTENÍTICOS**



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA



E.U.I.T.I.Z

DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE MATERIALES

NOMBRE DEL ALUMNO
JAIME MEDINA BORJA

ESPECIALIDAD
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, MECÁNICA

DIRECTOR DEL PROYECTO
MARÍA ANTONIETA MADRE SEDILES

CONVOCATORIA
SEPTIEMBRE 2014

0 PRESENTACIÓN Y OBJETO DE ESTUDIO

1 INTRODUCCIÓN AL ACERO

1.1 DEFINICIÓN

1.2 HISTORIA DEL ACERO

2 PROPIEDADES DEL ACERO

2.1 FASES DEL ACERO

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

3 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES

3.1 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS

3.2 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS

3.3 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

3.4 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

3.5 ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN

4 ENSAYOS DE MATERIALES

4.1 DUREZA

4.1.1 DUREZA BRINELL

4.1.2 DUREZA VICKERS

4.1.3 DUREZA ROCKWELL

4.2 MICRODUREZA

4.3 METALOGRAFÍA

5 MECANISMOS DE AUMENTO DE RESISTENCIA

5.1 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN FRÍO

6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

6.1 RECOCIDO EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

6.2 TRATAMIENTO TÉRMICO REALIZADO

7 ACEROS ESTUDIADOS

7.1 SERIE AISI 303

7.2 SERIE AISI 304

7.3 SERIE AISI 310

7.4 SERIE AISI 316

8 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

8.1 PASOS REALIZADOS EN LA PARTE EXPERIMENTAL

8.2 MICRODUREZA

8.3 METALOGRAFÍA

9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

10 CONCLUSIONES

11 BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN

0 PRESENTACIÓN Y OBJETO DE ESTUDIO

En este proyecto se va a hacer una introducción general a los aceros teniendo en cuenta su historia, propiedades, tipos, ensayos y tratamientos térmicos a los que son normalmente sometidos y se hará posteriormente un estudio específico de los aceros inoxidable austeníticos.

Se van a analizar los aceros de la serie AISI 300, concretamente el AISI 303, AISI 304, AISI 310, AISI 316 y sus homólogos sometidos a tratamiento térmico.

El tratamiento térmico realizado consiste en un recocido. Las probetas fueron calentadas a 850 °C durante 1 hora y posteriormente enfriadas en el interior del horno en unas condiciones tales que cuando se alcanza la temperatura ambiente, el metal se encuentra en un estado estructural muy próximo al equilibrio estable.

Una vez realizado el tratamiento térmico, se ensayaron las probetas mediante el método de microdureza Vickers y se sometieron a un ensayo metalográfico con microscopio óptico.

A partir de los resultados obtenidos, se hará un estudio acerca de las diferencias que existen entre los aceros tratados térmicamente y los no tratados, comparando propiedades y microestructura.

Por último se concluirá el estudio teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la parte experimental, analizándolos y comentándolos.

1 INTRODUCCIÓN AL ACERO

1.1 DEFINICIÓN

El acero sirve comúnmente para denominar una aleación de hierro con carbono cuya cantidad varía entre el 0,1% y el 2% en peso de su composición. En el caso de aleaciones en las que el carbono está entre el 2% y el 6,67% se habla de fundiciones.

Siemens define el acero como un compuesto de hierro con otra sustancia que incrementa su resistencia.

El acero conserva las características metálicas del hierro y mejora sus propiedades físico-químicas gracias a la adición de carbono y otros elementos como: aluminio, azufre, boro, cobalto, cromo, cobre, fósforo, manganeso, molibdeno, niobio, níquel, nitrógeno, plomo, selenio, silicio, telurio, titanio, vanadio, wolframio, circonio.

Existen múltiples tipos de aceros en función de los elementos de la aleación.

1.2 HISTORIA

Los primeros utensilios de hierro descubiertos por los arqueólogos en Egipto datan del año 3.000 a.C., y se sabe que antes de esa época ya se empleaban adornos de hierro. Los primeros restos de acero que se conocen se descubren en África hacia el año 1400 a. C.

Los griegos ya conocían la técnica para endurecer armas de hierro mediante tratamiento térmico hacia el 1.000 a.C.

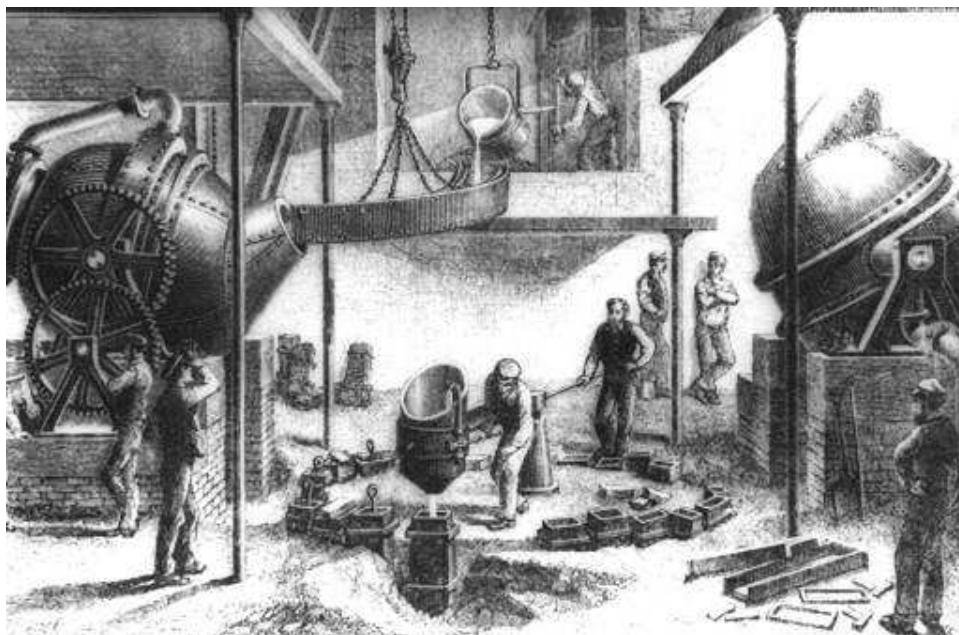
Aproximadamente en el año 300 a. C surge el proceso de creación del “acero Wootz” en India y Sri Lanka. Este método usaba un horno de viento alimentado por los monzones creando un acero conocido como “Damasco”.

En torno al siglo I a. C se produce acero en China durante la dinastía Chan.

El acero de crisol se produce en Merv (Turkmenistán) entre los siglos IX y X.

El primer proceso de obtención industrial del acero fue ideado por el relojero inglés B. Huntsman en 1740, proceso llamado “al crisol”, porque consistía en cementar, es decir, enriquecer el contenido de carbono del hierro con carbón vegetal y fundir el producto obtenido en un crisol.

En el siglo XIX (1856) Henry Bessemer desarrolló un método para la producción de acero en grandes cantidades. Consistía en obtener directamente acero mediante el afino de la fundición, introduciendo una corriente de aire en un recipiente (actualmente denominado convertidor). En él, el calor que mantenía líquida la colada lo suministraba la reacción exotérmica de oxidación del Si.



Producción de acero Bessener.

Un año después, en 1857 Carl Wilten Siemens desarrolló un método de obtención del acero basado en la descarbonización de la fundición de hierro dulce y óxido de hierro.

El uso de los hornos de arcos eléctricos comenzó en 1902 descubiertos por Paul Heroult. El proceso de Horno de Arco Eléctrico, (EAF, por sus siglas en inglés Electric Arc Furnace) usa la electricidad para fabricar acero nuevo a partir de acero viejo. El proceso consta de los siguientes pasos:

Los residuos de metal son colocados en un contenedor compuesto por residuos de chatarra de autos, línea blanca y hierro fundido que mantiene el equilibrio químico.

La chatarra es colocada en una cesta donde se realiza un pre-calentamiento y es llevada al horno EAF.

Una vez cargado el horno con la chatarra de metal se colocan unos electrodos que son alimentados de electricidad por el horno de arco y que trituran el metal. Pequeños voltajes son seleccionados para esta primera parte de la operación con el fin de proteger el techo y las paredes del calor excesivo de los arcos eléctricos. Una vez los electrodos han llegado a la fusión en la base del horno y los arcos están protegidos por la chatarra de metal, se aumenta el voltaje acelerándose así la fusión.

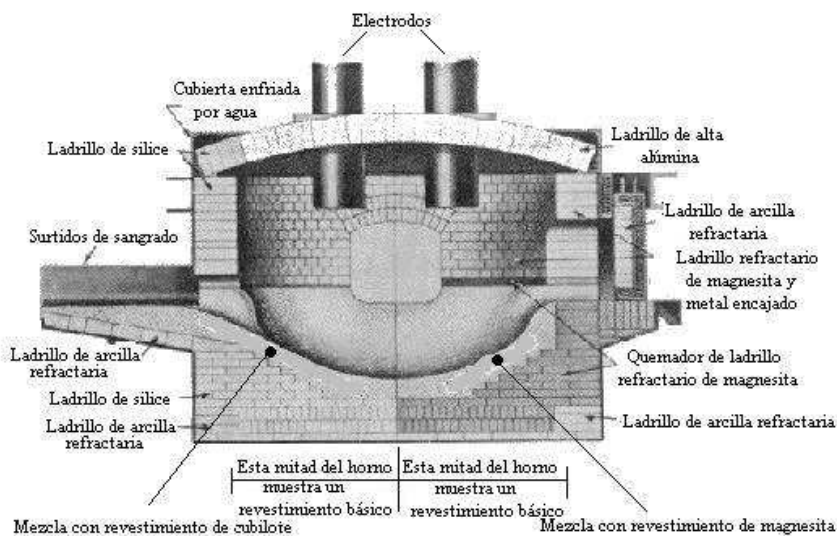
Una parte importante de la producción de acero es la formación de escoria, que flota en la superficie del acero fundido. Esta escoria consiste en metales óxidos y ayuda a quitar las impurezas del metal.

Con la formación de escoria se eliminan las impurezas de silicio, azufre, fósforo, aluminio, manganeso y calcio. La eliminación del carbono tiene lugar después de la quema de estos elementos, ya que tienen mayor afinidad al oxígeno. Los metales que tienen una menor afinidad con el oxígeno que el hierro, como son el níquel y el cobre, no se pueden eliminar a través de la oxidación si no que deben eliminarse a través del tratamiento químico de la chatarra.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

Una vez que la temperatura y la química son correctas, el acero se extrae en un cazo pre-calentado. Para algunos tipos de acero especiales, incluyendo el acero inoxidable, la escoria se vierte en el contenedor para ser tratado en el horno y recuperar los elementos de aleación.

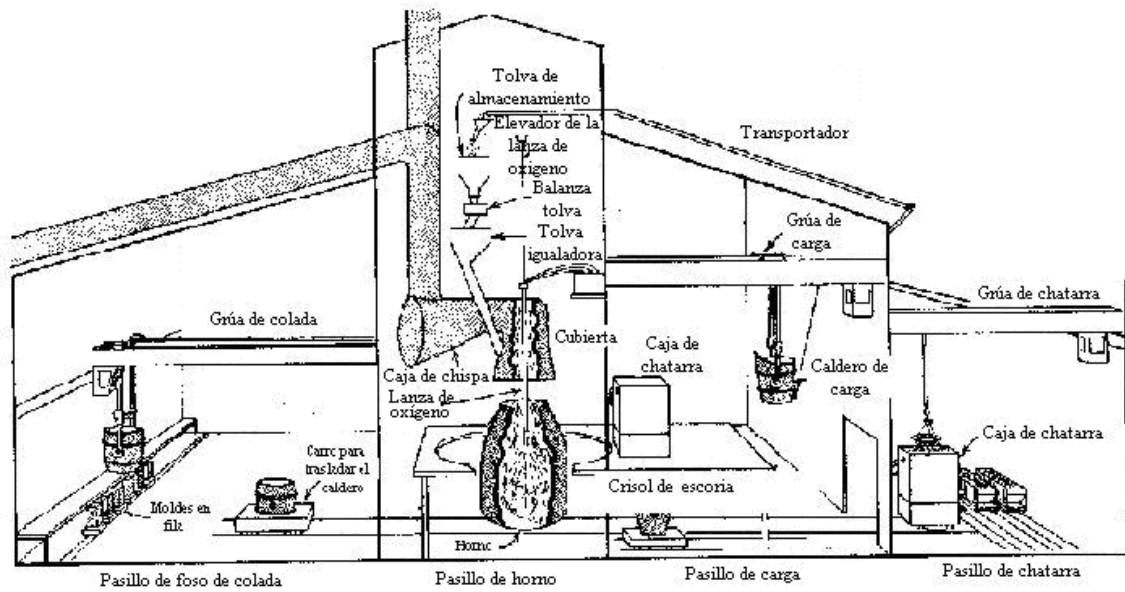
Como las condiciones de refinado de estos hornos se pueden regular con mayor eficiencia que en los hornos de crisol abierto o los hornos básicos de oxígeno, los hornos eléctricos son sobre todo útiles para producir aceros inoxidables y aceros aleados que deben ser fabricados según especificaciones muy exigentes.



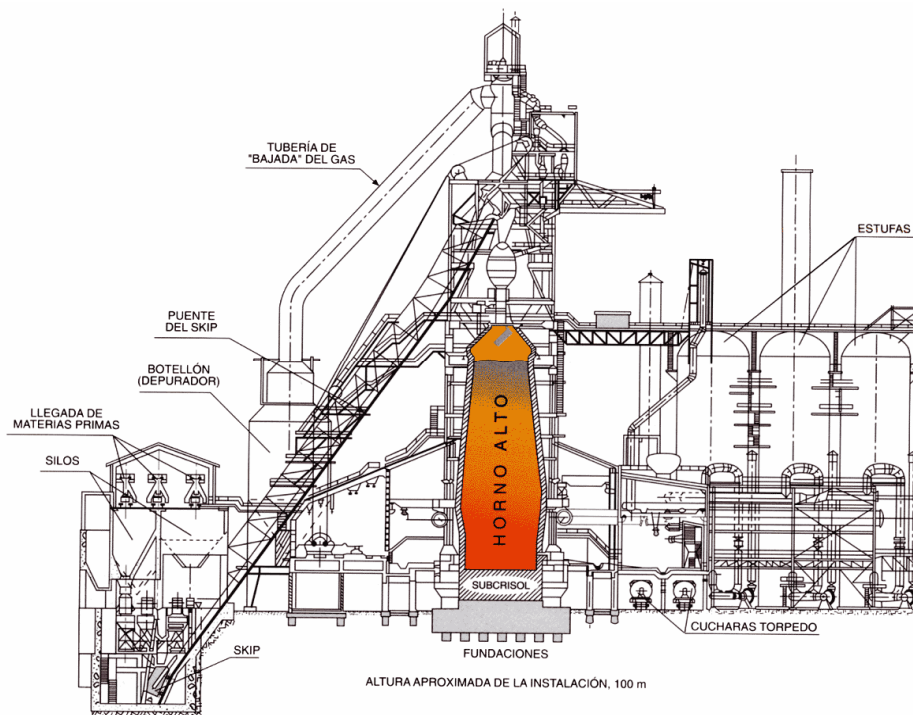
Corte de un horno eléctrico

El primer proceso de acería de oxígeno básico fue el proceso LD desarrollado en 1952 por AG Voestalpine en Linz, método para producir acero en el cual el hierro fundido rico en carbono se transforma en acero. Este proceso tiene lugar en un recipiente semejante al convertidor Bessemer. En él se introduce hierro fundido y chatarra de acero y se proyecta sobre la superficie un chorro de oxígeno a una presión muy grande. El carbono y las impurezas se queman rápidamente.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos



Esquema de una planta de oxígeno para producción de acero.



Esquema de un alto horno.

2 PROPIEDADES DEL ACERO

Es complicado definir unas características generales del acero ya que éstas dependen del tipo considerado. Sin embargo citaré unas cuantas genéricas:

Densidad media de 7850 kg/m³.

Puede contraerse, dilatarse y fundir.

Su punto de fusión depende del tipo de aleación; el punto de fusión del componente principal del acero, el hierro, es de 1510° C en estado puro, sin embargo al añadirle elementos de aleación este valor baja aproximadamente hasta los 1375° C. Generalmente la temperatura de fusión aumenta a medida que aumenta el % de carbono.

Tiene altos niveles de tenacidad (principalmente en aceros para herramientas).

Es dúctil, se pueden obtener hilos delgados llamados alambres.

Es maleable, se puede procesar y obtener láminas delgadas denominadas hojalata (láminas entre 0,5 y 0,12 mm de espesor).

Es fácilmente mecanizable.

Su dureza varía entre la del hierro y la que se obtiene al alearlo.

Presenta buen grado de soldabilidad.

La corrosión es su mayor desventaja. Aparece ya que su principal elemento (el hierro) se corroe fácilmente. Tradicionalmente los aceros se han protegido con tratamientos superficiales y aleándolos como es el caso de los aceros de construcción corten y aceros inoxidables.

Los aceros tienen altos niveles de conductividad eléctrica (3.000.000 S/m), es por ello que son utilizados en líneas de alta tensión donde se usan conductores de aluminio con alma de acero que proporciona la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vanos entre torres.

Gracias a la propiedad de no perder su imantación, los aceros se usan para la fabricación de imanes permanentes artificiales. Sin embargo si son calentados por encima de la temperatura de Curie, pierden su magnetismo, comportándose como materiales puramente paramagnéticos.

En cuanto a los aceros inoxidables, los ferríticos y martensísticos son magnéticos. Sin embargo los aceros inoxidables austeníticos no son magnéticos. La austenita es una disposición específica de átomos de carbono y hierro que se conoce también como hierro- γ (gamma) y es la forma estable del hierro puro entre los 900 y los 1400 °C. Este tipo de acero inoxidable no es magnético pero puede endurecer por deformación apareciendo martensita en su estructura (el hierro- γ pasa a hierro- α). Cuando esto ocurre pueden aparecer propiedades magnéticas, mayores cuanto más martensita se forme.

2.1 FASES DEL ACERO

En las aleaciones hierro-carbono se encuentran diversos constituyentes:

La ferrita. Es una solución sólida de inserción de carbono en hierro alfa, se considera como hierro puro. Es el constituyente más blando y maleable del acero, presenta una dureza Brinell de 90, una resistencia a la tracción de 280 N/mm² y un alargamiento del 35-40%. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y es magnética.

La cementita es un carburo de hierro cuya fórmula es Fe₃C, es el constituyente más frágil y duro de los aceros con una HV de 840.

Su alargamiento es prácticamente nulo así como su resiliencia. Es magnética hasta que alcanza el punto de Curie (210° C).

La perlita está formada por la mezcla eutéctode de dos fases: ferrita y cementita, es por ello que tiene propiedades intermedias entre ellas. Tiene una dureza Brinell de 200, una resistencia a la tracción de 800 N/mm² y un alargamiento del 15%.

La austenita es una solución intersticial de carbono en hierro gamma, es el constituyente más denso de los aceros. Es deformable, con una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción que oscila entre 110 y 800 N/mm², un alargamiento entre el 20-25% y no es magnética.

La martensita es una solución sobresaturada de carbono en hierro alfa. Se obtiene por enfriamiento muy rápido de un acero austenizado.

La bainita, igual que en los casos anteriores, se obtiene a partir de la austenita mediante transformación isotérmica entre unas temperaturas que varían entre 250 y 550° C.

Existen dos tipos de bainita:

La bainita superior está formada por agujas discontinuas de cementita paralelas a agujas de ferrita. Sus características mecánicas son: 43-55 HRC, resistencia de 1600-2000 N/mm² y un alargamiento del 3-10%.

La bainita inferior está formada por pequeñas placas de carburo paralelas entre sí. Tiene las siguientes características: 45-60 HRC, resistencia de 1700-2300 N/mm² y un alargamiento del 1-6%.

-La ledeburita es un constituyente de las fundiciones, es una eutéctica compuesta por austenita y cementita estable hasta una temperatura de 723° C.

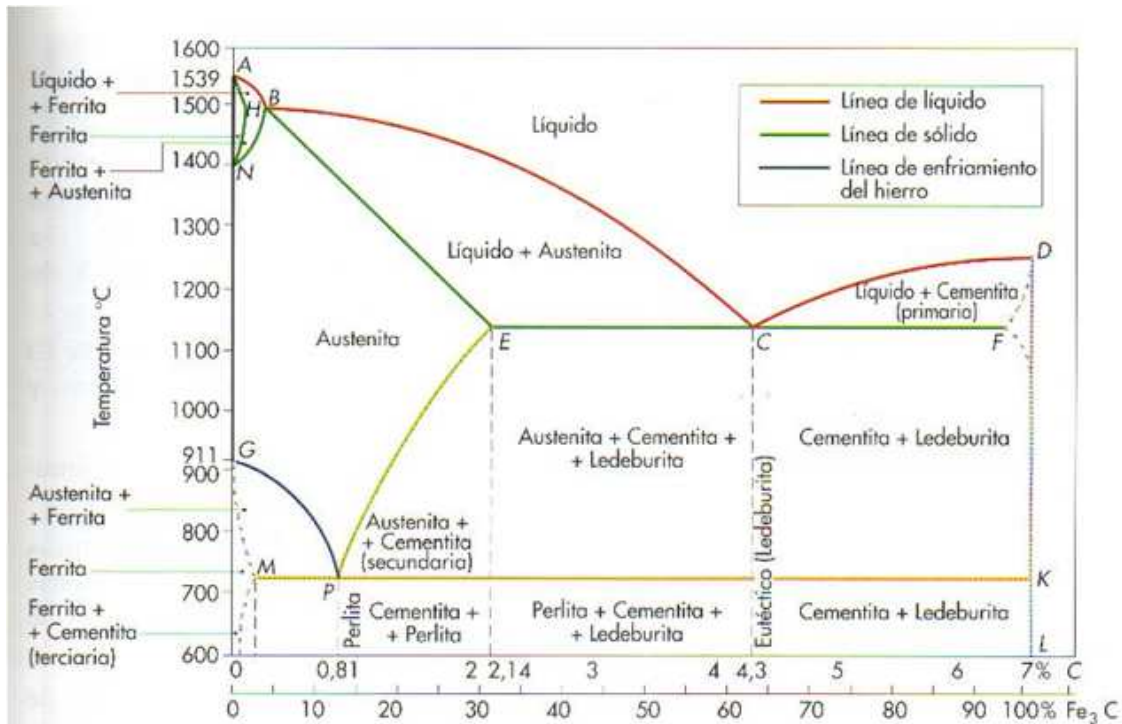


Diagrama hierro – carbono.

A continuación se comenta el diagrama hierro-carbono:

La abscisa con valor 0,025% de carbono representa el máximo porcentaje de carbono que puede disolver la ferrita.

El valor 0,08% de carbono en el eje de abscisas representa el máximo porcentaje de carbono que puede contener una solución sólida el hierro delta.

El punto B (0,18% de C) corresponde al punto peritético, punto de mayor temperatura a la que es estable la austenita, 1492° C.

La abscisa con porcentaje 0,8% de carbono corresponde al punto eutectoide dónde toda la masa de austenita se transforma en perlita que es el constituyente eutectoide.

El punto E de la figura marca la máxima solubilidad del carbono en hierro gamma, es decir el máximo contenido de carbono en austenita.

El punto C, correspondiente al 4,3% de carbono, indica el punto eutético dónde toda la masa de la aleación se funde o solidifica a una determinada temperatura.

El límite del diagrama corresponde a un porcentaje de carbono de 6,67% correspondiente a la cementita. Las aleaciones con contenidos en carbono superiores a dicho 6,67% están formadas por grafito y cementita y no tienen ninguna aplicación industrial.

Aunque no aparece en la tabla, en el eje de ordenadas con un valor de 210° C (Temperatura de Curie) tiene lugar el cambio magnético de la cementita, por debajo de dicha temperatura la cementita es magnética, por encima deja de serlo.

A la temperatura de 723° C tiene lugar la transformación eutectoide, recta M-K que indica el límite de la perlita y la formación del eutectoide.

El cambio magnético del hierro alfa se da a una temperatura de 768° C, por debajo de dicha temperatura existe el hierro alfa magnético y por encima hierro beta o hierro alfa no magnético.

Entre las temperaturas de 723 y 910° C se da la temperatura crítica superior. Este valor depende del contenido de carbono, por ejemplo para un 0 por ciento de contenido en carbono tiene un valor de 910° C (punto G). Se define temperatura crítica superior como el límite de la ferrita, por encima de dicha temperatura el acero está constituido por austenita, por debajo de dicho punto coexisten ferrita y austenita.

La línea P-E representa el límite de la cementita que varía entre las temperaturas de 723 y 1130° C.

A 1300° C se produce la transformación eutéctica.

A partir de los 1400° C da comienzo la transformación de hierro gamma a hierro delta.

La transformación peritética se da a 1492° C (límite superior de la austenita).

1539° C es la temperatura de fusión del hierro puro.

La línea de líquido indica la temperatura a partir de la cual todo el material se encuentra en estado líquido.

La línea de sólido indica la temperatura de solidificación, por debajo de dicha línea todo el material se encuentra en estado sólido.

Entre ambas líneas coexiste una mezcla de líquido-sólido.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

Existen distintas formas de clasificar los aceros:

Clasificación atendiendo a su % de carbono:

Aceros hipoeutectoides: tienen un % de C inferior al del punto eutéctico.

Aceros eutectoides: tienen un % de C igual al del punto eutéctico.

Aceros hipereutectoides: tienen un % de C superior al del punto eutéctico.

Clasificación según el proceso de fabricación:

Aceros Bessemer.

Aceros Siemens.

Aceros de hornos eléctricos.

Clasificación atendiendo al grado de desoxidación:

Aceros efervescentes.

Aceros semicalmados.

Aceros calmados.

Clasificación en relación a los microconstituyentes:

Aceros perlíticos.

Aceros martensíticos.

Aceros austeníticos.

Aceros ferríticos.

Aceros con carburos.

Clasificación según su composición química:

Aceros aleados.

Aceros no aleados.

Clasificación atendiendo a su utilización:

Aceros para estructuras.

Aceros de construcción mecánica.

Aceros para útiles y herramientas.

Aceros con propiedades y aplicaciones específicas.

Aceros inoxidables ferríticos.

Aceros inoxidables austeníticos.

Aceros inoxidables martensíticos.

Aceros inoxidables dúplex.

Aceros inoxidables endurecidos por precipitación.

3 TIPOS DE ACEROS INOXIDABLES

La familia del acero inoxidable se compone de más de 100 aleaciones metálicas cuya característica común es que tienen un contenido máximo de carbono del 1,2 % y un contenido mínimo de cromo de 10,5%.

Dentro de esta amplia gama de aceros existen diferentes grados de resistencia a la corrosión, desde las condiciones más moderadas que se dan en interiores (oficinas, casas...) hasta las condiciones más extremas (ambientes marítimos, salpicaduras de sal descogelante en bajos de vehículos, trabajos en atmósferas oxidantes y a altas temperaturas...)

Pero, ¿por qué los aceros inoxidables son inoxidables? Por que tienen cromo que es un metal reactivo que se combina con el oxígeno del aire o en cualquier otra condición oxidante para formar una película sobre el acero inoxidable que lo aísla del medio agresivo. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables es el resultado de la presencia de esta fina, densa, no porosa, continua, insoluble, adherente, tenaz, autoregenerante e impermeable capa de óxido hidratado de cromo en la superficie que impide el contacto del acero con el medio oxidante.

La composición de esta película varía con el tipo de acero y con los diferentes tratamientos tales como laminado, decapado (pickling) o tratamiento térmico.

Es el fenómeno denominado pasivación. La película formada es inerte frente a las condiciones oxidantes de la atmósfera terrestre. Esta película es transparente y brillante y confiere al acero inoxidable la posibilidad de retener su apariencia metálica (stainless). El rango de condiciones bajo las cuales un acero inoxidable desarrolla pasivación puede ser amplio o reducido, la pasividad puede ser destruida por pequeños cambios de las condiciones. En condiciones favorables el metal adquiere potenciales de disolución cercanos a los de los metales nobles, lo cual lo hace muy estable. Cuando la pasividad se destruye el potencial se acerca al del hierro, es decir es muy oxidable.

Hay un número importante de aceros inoxidables. Su resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y costo varía en un rango muy amplio, por esa razón es importante especificar el acero inoxidable más apropiado para cada aplicación. El costo se eleva entre 5 y 10 veces el de un acero al carbono. Conviene tener en cuenta que el término “Inoxidable” es un término genérico que incluye a más de 130 composiciones químicas diferentes de aceros y aleaciones inoxidables. Pueden estar aleados además, con Cu, Al, Si, Ni, Mo, Nb, Ti... que también aumentan su resistencia a la corrosión.

Como ya se ha dicho, se necesita un ambiente oxidante para formar la película de óxido de cromo. Con un 10% de cromo, que es la mínima proporción, la atmósfera terrestre es capaz de formar una película protectora para un ambiente poco agresivo como puede ser el interior de una vivienda, pero con el tiempo si este acero presta servicio a la intemperie acaba corroyéndose.

Aún siendo la resistencia a la corrosión la propiedad más apreciada, no debemos olvidar otras propiedades. Algunos aceros se someten a tratamientos térmicos, resisten altas temperaturas, se mecanizan con facilidad, tienen capacidad de deformarse plásticamente y son soldables.

Por soldabilidad se entiende la facilidad con la que un material puede ser fabricado por soldadura, la capacidad de la unión soldada para aguantar las tensiones y condiciones a que las que se ve sometido en servicio así como la capacidad del material de mantener sus propiedades generales tras su soldadura.

La soldabilidad de los aceros inoxidables depende principalmente de la estructura metalográfica de los mismos.

La soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos es aceptable-mala según la composición de cada uno, su espesor, y sobre todo, de la aplicación de servicio pretendida, ya que la soldadura puede afectar muy negativamente las propiedades de estos aceros.

La soldabilidad general de todos los aceros pertenecientes a la familia de los inoxidables martensíticos es muy mala.

La soldabilidad de los aceros inoxidables endurecibles por precipitación es aceptable bajo el punto de vista del comportamiento del acero frente a la soldadura, pero en cambio, muy mala respecto a que, tras soldadura, la estructura metalográfica de este acero en las zonas de soldadura y próxima a éstas cambia totalmente.

La soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos y dúplex es muy buena. Esto hace que estas familias de aceros sean la elección más común en procesos de fabricación que requieran soldadura.

Los aceros inoxidables tienen aplicaciones muy diversas: desde usos arquitectónicos hasta la utilización en equipos de la industria química con condiciones extremas de servicio.

Al seleccionar un acero inoxidable debe evitarse seguir el mismo sistema utilizado con los aceros al carbono. Resultados satisfactorios de un acero dado en condiciones específicas de temperatura, PH, concentración del medio agresivo, etcétera, no pueden extrapolarse a otras condiciones aunque parezcan similares. El método idóneo de selección se basa en la experiencia ya sea del usuario como la del fabricante del acero inoxidable. A medida que aumenta el riesgo de corrosión es necesario aumentar la concentración de cromo aunque debe recordarse que el aumento de resistencia a la corrosión no tiene por que ser proporcional.

Sin embargo con alrededor de 18% de cromo el acero está en condiciones de soportar las más rigurosas condiciones atmosféricas.

Los aceros inoxidables no son atacados por el ácido nítrico u otros ácidos oxidantes, sino más bien estos ácidos facilitan la formación de la película protectora. Por otra parte estos aceros no resisten la presencia de ácidos reductores como el ácido clorhídrico o fluorhídrico, y son atacados por las sales de ellos (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros).

En la industria se utilizan sustancias limpiadoras a base de cloruros para mejorar el aspecto de los aceros inoxidables. Deben tomarse precauciones ya que 40 minutos es el tiempo máximo de exposición a estos agentes. El ácido sulfúrico marca la frontera entre ácidos oxidantes y reductores ya que en algunos casos es inofensivo y en otros ataca fuertemente. El efecto de los ácidos como el de las sales varía con las condiciones de servicio, concentración del agente corrosivo y con el tipo de acero.

Para obtener la máxima resistencia a la corrosión es recomendable mantenerlos limpios y pulidos preservando así la superficie de sustancias extrañas que pudieran albergarse en los poros o irregularidades de la superficie. En el caso de aceros inoxidables templeables (martensíticos), la máxima resistencia a la corrosión se obtiene después de un temple completo.

Debe recordarse que cuando los aceros inoxidables sufren corrosión, ésta no es uniforme como en el caso de los aceros al carbono, sino localizada, por picaduras (pitting) o fisuras por corrosión bajo tensión. Debido a ello no puede prevenirse por el agregado de sobre espesores sino que debe evitarse la corrosión misma por medio de un conocimiento profundo del medio corrosivo y el acero utilizado.

A la hora de nombrar los aceros antiguamente se usaba la norma UNE, sin embargo hoy en día la notación más extendida es la AISI.

La norma AISI-SAE es una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en Estados Unidos.

AISI es el acrónimo en inglés de American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero), mientras que SAE es el acrónimo en inglés de Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores).

En 1912, la SAE promovió una reunión de productores y consumidores de aceros donde se estableció una nomenclatura y composición de los aceros que posteriormente AISI expandió.

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y está determinada por el tratamiento y la composición química, uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En relación a los aceros inoxidables:

Los aceros inoxidables ferríticos: Los tipos más comunes son el AISI 430, 409 y 434. Antiguamente se usaba la norma UNE según la cual estos aceros eran denominados F-31XX.

Los aceros inoxidables austeníticos: Se obtienen agregando níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el nombre. Los tipos más comunes son el AISI 303, 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Según norma UNE: F-35XX.

Aceros inoxidables martensíticos: son la primera rama de los aceros inoxidables, llamados simplemente al cromo y fueron los primeros desarrollados industrialmente. Los tipos más comunes son el AISI 410, 420 y 431. La norma UNE los denominaba F-34XX.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

Tabla Equivalencia Entre Normas					
AISI	DIN	SIS	AFNOR	EN EURO NORMA	EN 10088
201	1.4371	-	Z 12 CMN 18-07	-	-
301	1.4310	2331	Z 12 CN 17-07	X 12 CrNi 17- 7	1.4310
302	1.4319	2331	Z 10 CN 18-09	X 10 CrNi 18- 9	-
302 B	1.4330	-	-	-	-
303	1.4305	2346	Z 10 CNF 18-09	X 10 CrNiS 18- 9	1.4305
304	1.4301	2332	Z 6 CN 18-09	X 5 CrNi 18-10	1.4301
304 L	1.4306	2352	Z 2 CN 18-10	X 2 CrNi 19-11	1.4306
304 H	1.4948	-	Z 6 CN 18-11	X 6 CrNi 18-11	-
304 L	-	-	-	X 2 CrNi 18- 9	1.4307
304 LN	1.4311	2371	Z 3 CN 18-07 Az	X 2 CrNiN 18-10	1.4311
305	1.4303	2333	Z 8 CN 18-12	X 8 CrNi 18-12	-
308	-	-	-	-	-
309	1.4828	-	Z 15 CNS 20-12	X 15 CrNiSi 20-12	1.4828
309 S	1.4833	-	Z 15 CN 24-13	X 6 CrNi 22-13	1.4833
310	1.4841	-	Z 15 CNS 25-20	X 12 CrNi 25-21	-
310 S	1.4845	2361	Z 12 CN 25-20	X 12 CrNi 25-21	1.4845
314	1.4841	-	Z 12 CNS 25-20	X 15 CrNiSi 25-20	1.4841
316	1.4401	2347	Z 6 CND 17-11	X 5 CrNiMo 17-12-2	1.4401
316 L	1.4404	2348	Z 2 CND 17-12	X 2 CrNiMo 17-13-2	1.4404
316 N	-	-	-	-	-
316 LN	1.4406	2375	Z2 CND 17-12+N2	X 2 CrNiMoN 17-12-2	1.4406
316 Ti	1.4571	2350	Z6 CNDT 17-12	X 6 CrNiMo 17-12-2	1.4571
317	1.4449	2366	-	-	-
317 L	1.4438	2367	Z 2 CND 19-15	X 2 CrNiMo 18-16-4	1.4438
321	1.4541	2337	Z 6 CNT 18-10	X 6 CrNiTi 18-10	1.4541
321 H	1.4878	-	Z 6 CNT 18-12	X12 CrNiTi 18-9	-
347	1.4550	2338	Z 6 CNNb 18-10	X 6 CrNiNb 18-10	1.4550
348	1.4546	-	-	X 5 CrNiNb 18-10	-
403	1.4000	2301	Z 6 C 13	X 6 Cr 13	1.4000

Los aceros inoxidables se dividen en cinco grandes grupos dependiendo de su estructura micrográfica:

3.1 ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS (AISI 400)

Este tipo de aceros inoxidables son los mas económicos debido a su bajo contenido en Ni. Sin embargo, las ventajas económicas que se derivan de ello no se pueden aprovechar del todo en estas aleaciones debido principalmente a los problemas tecnológicos asociados a la elevada tendencia de precipitación de fases secundarias (dificultad de elaborar productos de gran espesor y problemas de soldabilidad). Sin embargo, debido a su buena resistencia a la corrosión bajo tensión (CBT), a la corrosión por picaduras y por resquicios, en medios conteniendo cloruros, pueden ser seleccionados en determinadas aplicaciones, como alternativa a los aceros inoxidables austeníticos.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos, tienen una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas.

El acero inoxidable tipo AISI 430 es el más representativo de este grupo, tiene aproximadamente 17% Cr y es considerado como una aleación multipropósito para aplicaciones en las cuales las exigencias de resistencia a la corrosión, especialmente en las uniones soldadas no sean importantes.

El acero inoxidable tipo AISI 444 (18% Cr, 2% Mo) posee una mejor resistencia a la corrosión por picaduras y por resquicios, equivalente al acero inoxidable austenítico del tipo AISI 316.

En los últimos años se han desarrollado aceros inoxidables ferríticos diseñados especialmente para su empleo en la fabricación de tubos de condensadores para agua de mar. Aleaciones para este tipo de aplicaciones suelen tener contenidos de $\text{Cr} > 26\%$ y $\text{Mo} > 3\%$ y se les denomina aceros inoxidables super-ferríticos.

Sus aplicaciones más comunes son:

Álabes de turbinas.

Industria alimenticia y sanitaria.

Industria automovilística (cámaras de combustión).



Acero inoxidable ferrítico usado en una cámara de combustión.

3.2 ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS (AISI 400)

Son aleaciones que tienen una estructura austenítica a elevadas temperaturas y que puede ser transformada a martensita después de un tratamiento térmico de temple, elevando su dureza y resistencia al desgaste. El contenido de carbono de estas aleaciones varía en un amplio rango (entre 0.15% y 1% C), mientras que el contenido de Cr suele oscilar entre el 12% y 18%. Los aceros inoxidables de bajo contenido en carbono (0.15% C) están asociados a un menor contenido en Cr debido a que éste tiende a estabilizar la ferrita a elevadas temperaturas, lo que impide al acero sufrir la transformación martensítica después del temple.

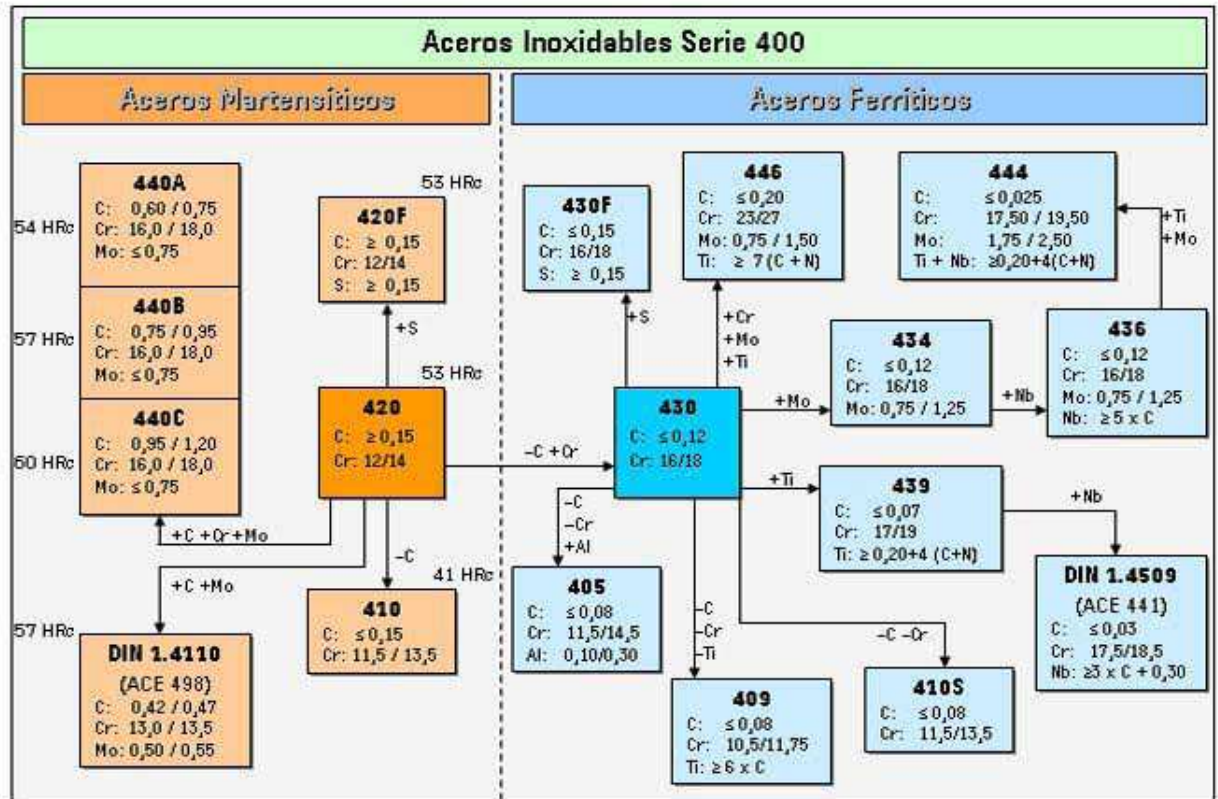
Todos los aceros inoxidables martensíticos pueden ser templados y revenidos y la dureza alcanzada dependerá del contenido de carbono de la aleación. En aceros de bajo carbono la dureza máxima es de 45 HRC y en los aceros de alto contenido en carbono la dureza puede alcanzar valores próximos a 60 HRC. Al igual que los aceros al carbono, estas aleaciones son susceptibles a la fragilidad cuando son tratados térmicamente después del temple en el rango de 450 a 540 °C.

Dentro de este grupo, el acero inoxidable más representativo es el tipo AISI 410 (12% Cr - 0,15% C - 1,0% Mn) que junto al acero AISI 431 puede ser empleado en la fabricación de pernos, ejes de bombas, válvulas, álabes de turbinas de gas y vapor. Los aceros inoxidables martensíticos de alto contenido en carbono (>0,2% C) son empleados para cuchillería, instrumentos quirúrgicos (tipos AISI 420 y AISI 440). La resistencia a la corrosión de este tipo de aceros inoxidables está asociada a su contenido de Cr y a su microestructura.

Las aleaciones de mayor contenido de C tienen una menor resistencia a la corrosión en condición de temple y revenido debido a la mayor susceptibilidad a la precipitación de carburos de cromo. En términos generales se puede decir que los aceros inoxidables martensíticos presentan una menor resistencia a la corrosión que las demás familias de aceros inoxidables pero por contra tienen una resistencia mecánica elevada. Algunas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente y alcanzar valores de resistencia superiores a 1400 Mpa. En la Tabla 1 (página 26) se muestran las composiciones químicas de los aceros inoxidables martensíticos más representativos.



Instrumentos quirúrgicos.



Cuadro que muestra la composición de diferentes aceros ferríticos y martensíticos.

3.3 ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS (AISI 300)

La serie austenítica contiene níquel como segundo elemento principal de la aleación. El Ni se utiliza para suprimir la transformación de la austenita y hacerla estable incluso a temperatura ambiente y más baja. Así, cuando el níquel se agrega al acero inoxidable en cantidades suficientes, la estructura cambia a austenita. Los metales de aporte serie 300 de acero inoxidable austenítico (con contenido de Cr que varía desde 15-32% y contenido de Ni de 8-37% aproximadamente) se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones de soldadura ya que son mucho más soldables que los aceros inoxidables ferríticos, martensíticos o de endurecimiento por precipitación.

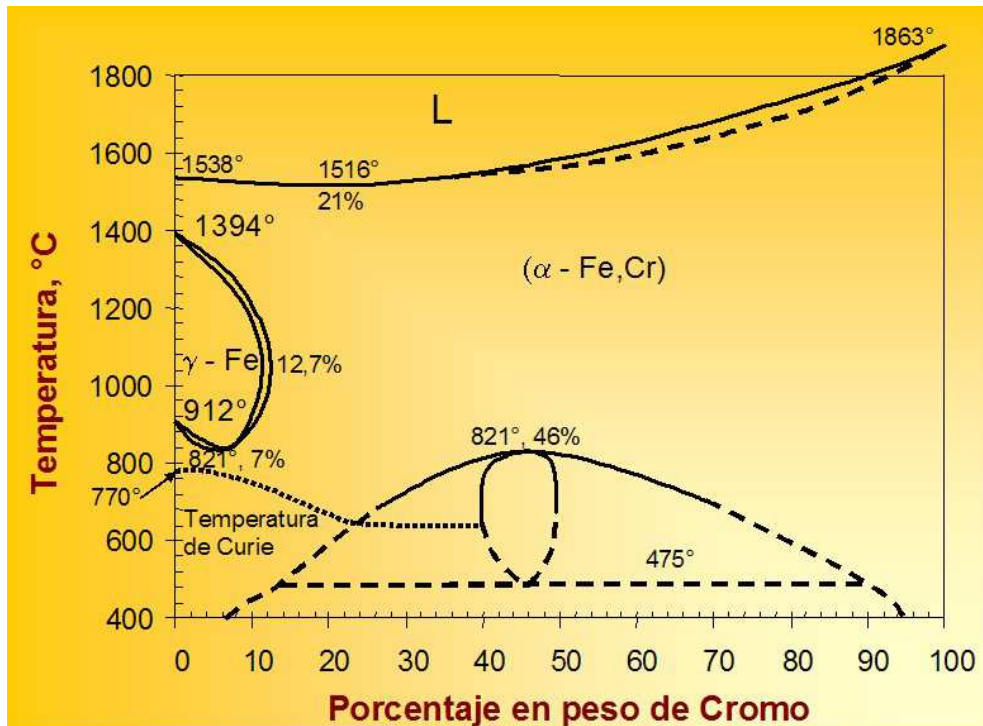
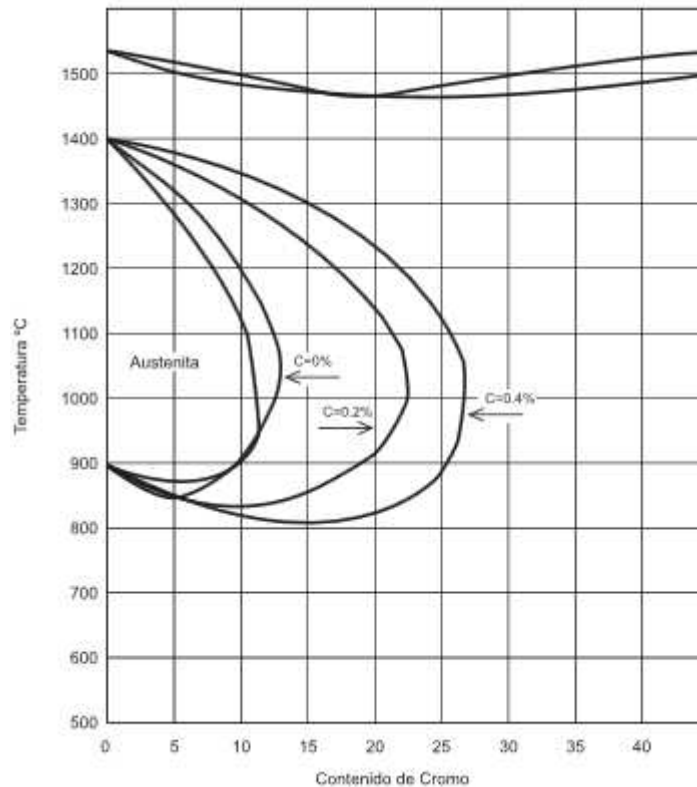


Diagrama Fe – Cr

Las aleaciones hierro-cromo, con menos de 12% de cromo, transforman su estructura ferrítica a austenítica (fase gamma, γ) durante el calentamiento. Por enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente, conseguiremos transformar la austenita en martensita (aceros inoxidables martensíticos).



Influencia del carbono ampliando el bucle gamma.

En el diagrama hierro-cromo, el bucle gamma se expande a la derecha al aumentar el contenido de carbono de la aleación. El carbono favorece la formación de fase gamma.

Cabe señalar que si el carbono alcanza 0.6% el límite del bucle gamma queda limitado para un cromo aproximado del 18%. Por lo tanto, con carbono superior al 0.4% ya no se amplía el bucle y el exceso de carbono queda en el acero formando distintos tipos de carburos de hierro y cromo que dependen de la temperatura, del contenido de carbono y de cromo.

Los aceros inoxidables austeníticos presentan las siguientes características:

Elevada resistencia a la corrosión en una amplia gama de ambientes corrosivos, generalmente mejor que la de los aceros martensíticos o ferríticos, pero son vulnerables al agrietamiento por corrosión bajo tensiones en ambientes de cloruro.

Excelente soldabilidad, mejor que los grados ferríticos y martensíticos, aunque antes de hablar de soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos, conviene tener en cuenta alguna de sus propiedades:

Los aceros inoxidables austeníticos tienen un elevado coeficiente de expansión térmica y una baja conductividad térmica respecto a los aceros ferríticos, por lo que se produce al soldarlos mayor tensión residual, acumulación de calor en las zonas de uniones soldadas y mayor deformación de las piezas.

En cuanto a los problemas posibles relacionados con efectos de precipitación y segregaciones químicas producidas durante la soldadura, estos pueden minimizarse con el control de la metalurgia del metal base, la práctica de la soldadura y la selección de los consumibles adecuados.

Los principales problemas de la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos son:

Aparición de fases intermetálicas frágiles desarrolladas a partir de la fase ferrita δ .

Aparición de precipitados de carburos que pueden dar problemas de pérdida de resistencia a la corrosión (especialmente por picaduras).

Aparición de segregaciones en el centro de los cordones de soldadura, que pueden dar lugar a "fisuración en caliente"

Excesiva acumulación de calor en las zonas soldadas, lo cual aumenta la producción de cada uno de los defectos anteriores además de provocar mayor distorsión en los materiales que se sueldan

Las soluciones que se toman para resolver estos inconvenientes son:

Controlar la cantidad de calor durante la soldadura (limitar el aporte térmico a 2,5 KJ/mm) y la temperatura de servicio del material, de forma que no esté expuesto durante prolongados períodos de tiempo a temperaturas de fragilización (500 a 950° C). Este requisito es más importante cuanto mayor es la cantidad de ferrita δ tanto en el metal depositado como en el material base. Se debe tener en cuenta que una cierta cantidad de esta fase ferrita δ es beneficiosa e incluso imprescindible en ciertos tipos de aceros para evitar el defecto de fisuración en caliente.

Controlar la cantidad de carbono, principalmente del material base que se escoja, ya que, normalmente los consumibles de soldadura son de muy bajo contenido de carbono. Otra opción es utilizar aceros inoxidables estabilizados con titanio o niobio. En este caso, los consumibles a utilizar pueden ser o bien de bajo contenido en carbono o estabilizados con niobio (el titanio se oxida y se pierde en forma de escoria durante la soldadura).

Soldar sin precalentar los aceros inoxidables austeníticos, con cordones de soldadura estrechos, limitando la acumulación de calor y el tiempo de exposición a altas temperaturas. Realizar secuencias de soldadura lógicas, repartiendo las tensiones y el calor aportado en toda la pieza para no exponer ningún cordón a excesiva sollicitación de tensiones. Limitar la temperatura entre pasadas y del material base a un máximo de 150° C. Esperar hasta su enfriamiento antes de seguir soldando. Estas últimas precauciones favorecerán también la limitación en deformaciones y la excesiva concentración de tensiones que pudieran producirse.

Este tipo de aceros presenta una sobresaliente maleabilidad y ductilidad, mejor que los grados ferríticos y martensíticos.

Muy buenas propiedades criogénicas y buena resistencia a altas temperaturas. La plasticidad de la estructura de la austenita, transmite a estos aceros su tenacidad, reducción en área y excelente resistencia al impacto aún a temperaturas criogénicas.

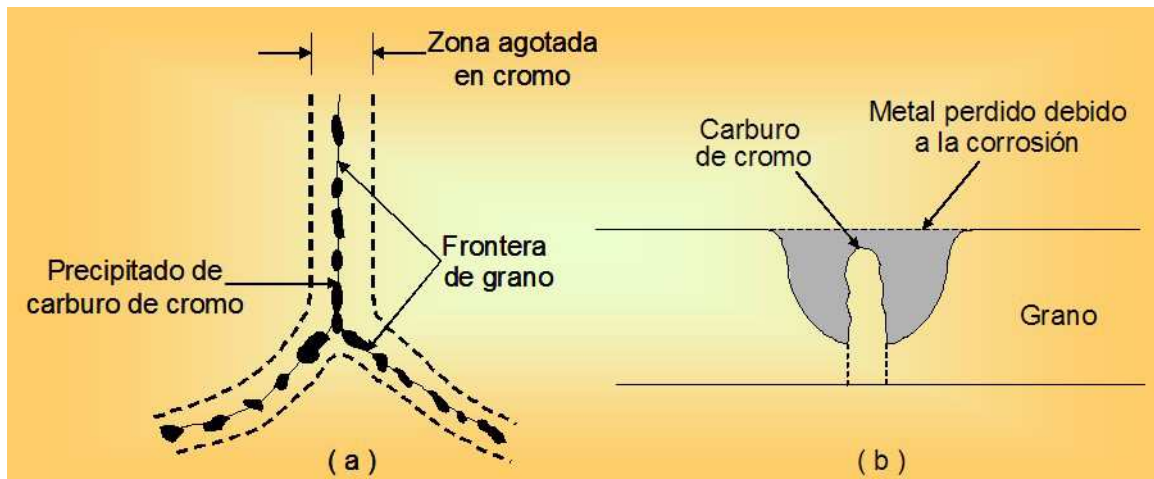
Son endurecibles solamente por trabajo en frío. Los aceros inoxidables austeníticos no pueden ser templados para obtener martensita, ya que el níquel estabiliza la austenita a temperatura ambiente e incluso por debajo de ella.

Comparado con el acero al carbono posee menor punto de fusión, menor conductividad térmica, mayor resistencia eléctrica y coeficientes de expansión térmica aproximadamente 50% mayores.

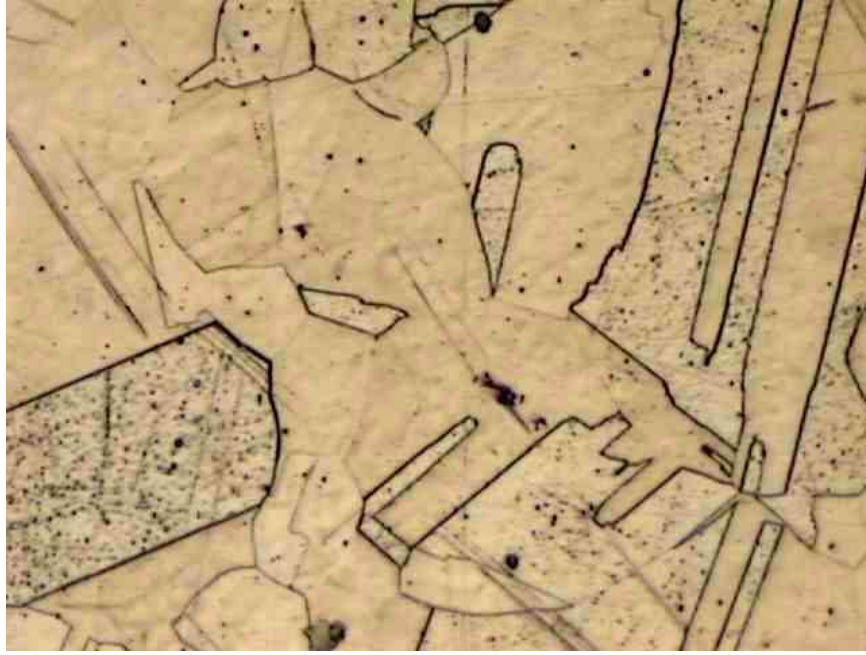
Las características magnéticas de los aceros inoxidables austeníticos varían desde no magnéticos como los tipos 310, 320 y 330 completamente austeníticos, a notablemente magnéticos como en el tipo 312, que contiene más de un 25% de ferrita. La mayoría de los aceros inoxidables austeníticos comunes tales como 308(L), 309(L), 316(L) y 347 son levemente magnéticos debido a la presencia de ferrita.

Puede aumentar su resistencia por laminado en frío, lográndose resistencias de hasta 1600 N/mm².

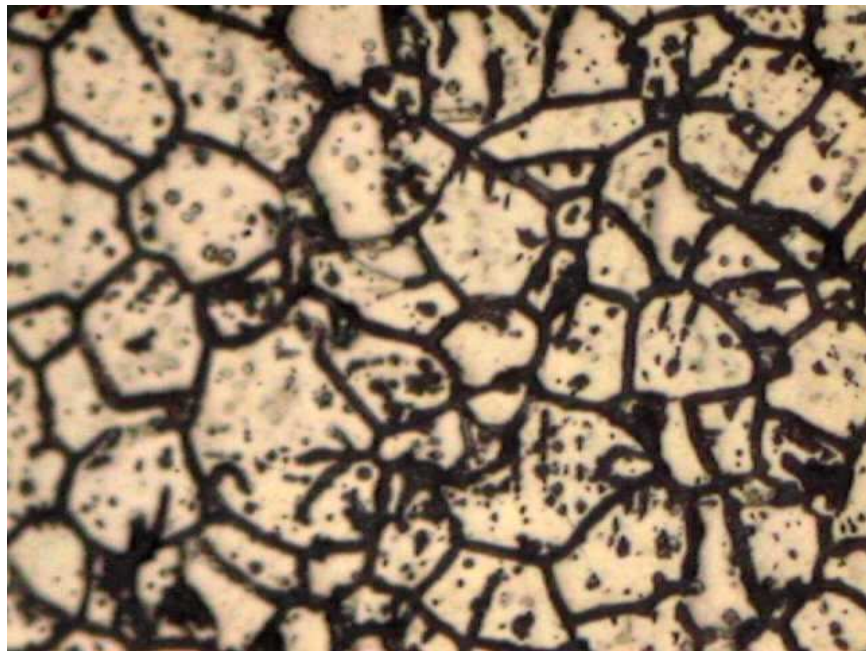
Tienen la desventaja de que pueden sufrir corrosión intergranular a temperaturas de entre 450° C y 650° C. Este fenómeno se da en zonas próximas a zonas soldadas. La principal causa de esta corrosión es la formación de carburos de cromo, para evitarlo se reduce el contenido de carbono a porcentajes inferiores a 0,03% o se alea con titanio, molibdeno o niobio; otro opción es someterlo a un hipertemple que consiste en calentar el acero por encima de 900° C para disolver los carburos y enfriarlo bruscamente para inhibir su formación.



Representación de la precipitación del carburo de cromo en el límite de grano en un acero AISI 304.



Microestructura del acero inoxidable AISI 304 sin sensibilizar.



Aspecto de la corrosión intergranular en un acero inoxidable AISI 304.

Análisis de aceros inoxidable austeníticos

Las aplicaciones más comunes de ese tipo de aceros son:

Accesorios y elementos decorativos para automóvil y construcción.

Piezas estructurales de ferrocarriles y aviación.

Depósitos en industria química, tanques de oxígeno líquido.

En industria alimentaria.

Cubtería y cuchillería.

Recipientes a presión y revestimientos de interiores de chimeneas.

También se usa en industria textil, papelera y fotográfica.



Tanque para el transporte de líquidos criogénicos.



Olla a presión.

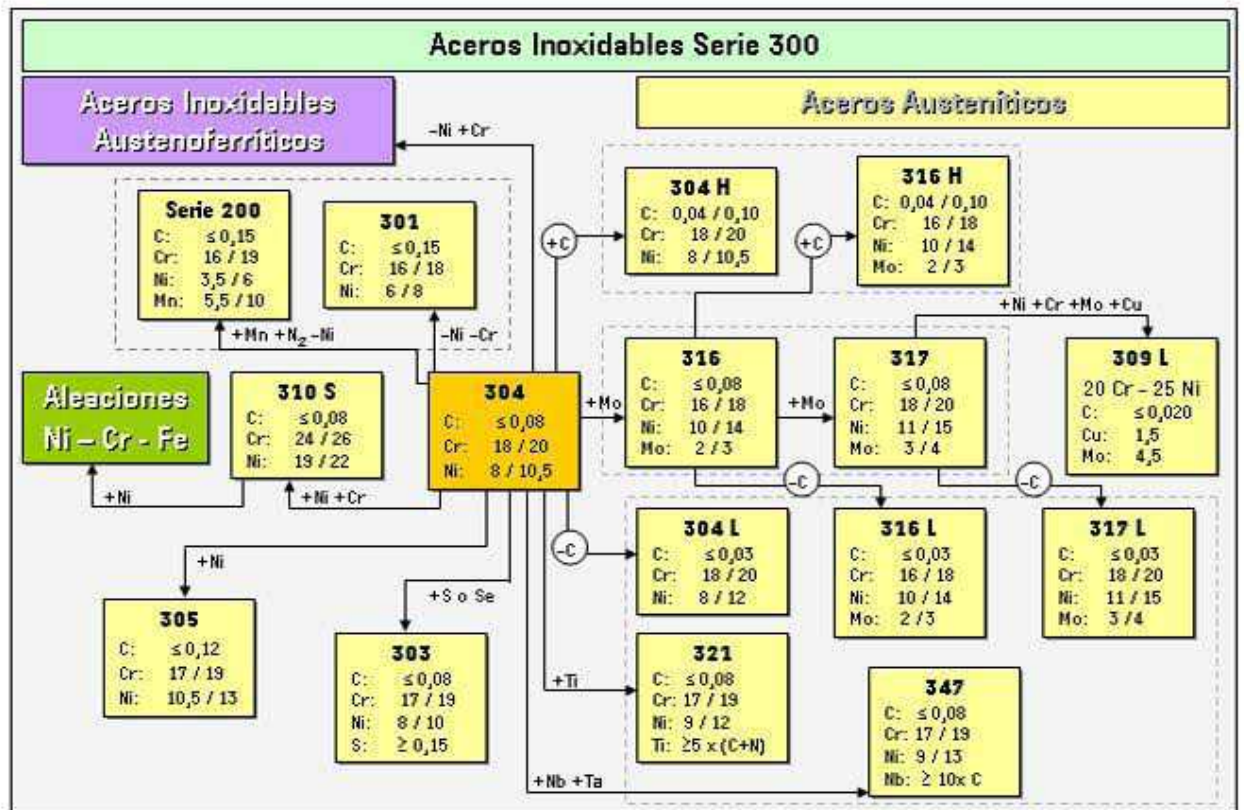


Figura que muestra la composición de diferentes aceros austeníticos.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

TABLA 1 : Distintos tipos de aceros inoxidables									
AISI	UNS	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%P	%S	Otros
ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS									
405	S40500	0,08	1	1	13	--	0,04	0,03	0,2 Al
430	S43000	0,12	1	1	17	--	0,04	0,03	--
434	S43000	0,12	1,25	1	17	--	0,04	0,03	1,0 Mn
446	S44600	0,2	1,5	1	25	--	0,04	0,03	0,25 N
18SR		0,004	0,3	1	18	--	--	--	2,0 Al, 0,4 Ti
Al 29-4 2	S44800	0,01	0,3	0,2	29	2,2	0,025	0,02	3,8 Mo
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS									
303	S30300	0,15	2	1	18	9	0,2	>0,15	0,06 Mo
304	S30400	0,08	2	1	19	9,2	0,045	0,03	--
316	S31600	0,08	2	1	17	12	0,045	0,03	2,0Mo
317	S31700	0,08	2	1	19	13	0,045	0,03	3,5Mo
321	S32100	0,08	2	1	19	14	0,045	0,03	Ti=5xC min
347	S34700	0,08	2	1	18	11	0,045	0,03	Cb+Ta=10xC min
20 Mo6		0,03	1	0,8	24	35	0,03	0,03	5,7 Mo,3Cu
254 Smo	S31254	0,03	1	0,8	20	18	0,03	0,01	6,2Mo 9,7Cu 0,2N
ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS									
403	S40300	0,15	1	0,5	12,2		0,04	0,03	
410	S41000	0,15	1	1	12,2		0,04	0,03	
416	S41600	0,15	1,25	1	13	--	0,04	0,03	0,6Mo
431	S43100	0,2	1	1	16	1,9	0,04	0,03	-
440A	S44002	0,67	1	1	17	--	0,04	0,03	0,75 Mo
416 PLUS	S41610	0,15	1	1	13	--	0,06	>0,15	0,6Mo

Tabla 1. Muestra la composición de diferentes aceros inoxidables.

3.4 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX

Estos aceros inoxidables fueron producidos por primera vez hace ya más de 60 años. Sin embargo, los primeros aceros inoxidables dúplex presentaron una serie de inconvenientes: elevada susceptibilidad a la precipitación de fases secundarias (como la fase sigma), baja tenacidad, baja resistencia a la corrosión y poca soldabilidad.

El empleo de nitrógeno como elemento de aleación revolucionó el desarrollo de estas aleaciones y permitió la aparición de la segunda generación de aceros inoxidables dúplex en la década de los 80, del cual el más representativo es sin lugar a dudas el acero inoxidable del tipo 22% Cr-5% Ni.

Estas aleaciones son muy resistentes a la CBT (Corrosión Bajo Tensión) y a la corrosión por picaduras inducida por cloruros. Como su nombre indica, los aceros inoxidables dúplex están constituidos microestructuralmente por dos fases: ferrita y austenita.

Estos materiales tienen la ventaja adicional de tener una elevada resistencia mecánica alcanzando valores de límite elástico entre 700-900 Mpa (el doble de límite elástico que los aceros inoxidables austeníticos) lo que puede representar en muchos casos un ahorro significativo en costos de material.

Un ejemplo de ello es la aplicación de estos materiales en la fabricación de tanques de almacenamiento para buques de carga, donde el acero inoxidable dúplex 2205 ha mostrado tener una resistencia superior al acero inoxidable austenítico y ha permitido un ahorro significativo en peso de la estructura.

Tienen aplicación en plataformas de ultra mar, usos marinos a temperaturas moderadas, intercambiadores de calor, plantas de desalación y petroquímicas, industria alimentaria...



Planta petroquímica.

3.5 ACEROS INOXIDABLES ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN

Son aceros inoxidables de Cr-Ni que contienen adicionalmente otros elementos de aleación como el Cu y Al que favorecen la precipitación de fases secundarias y elevan significativamente la dureza y resistencia mecánica del material cuando es sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento (endurecimiento por precipitación). Éste se basa en cambiar la solubilidad del sólido con la temperatura para producir partículas finas de una impureza de fase que impiden el movimiento de dislocaciones a través de la estructura del cristal.

Estos materiales ofrecen una alternativa para obtener una buena resistencia mecánica por medio de un tratamiento térmico a menor temperatura que puede ser aplicado incluso después de la fabricación de la pieza o elemento mecánico.

Las propiedades mecánicas (resistencia y dureza) que se pueden alcanzar con estas aleaciones son superiores incluso a las obtenidas en los aceros inoxidables martensíticos (aprox. 1480 Mpa). Asimismo, debido a que el contenido de Cr es mayor que en estos últimos la resistencia a la corrosión resulta también ser superior.

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación pueden ser del tipo martensítico, semi-austeníticos y austeníticos.

Tienen aplicaciones muy diversas como: intercambiadores de calor, calderas, tanques de combustible, componentes aeroespaciales y marinos.



Intercambiador de calor.

4 ENSAYOS DE MATERIALES

4.1 ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza es uno de los más utilizados en la industria metalúrgica. La dureza se define como la resistencia superficial que un material opone a la deformación.

Hay una gran variedad de ensayos sin embargo los más utilizados son:

Ensayo de dureza Brinell.

Ensayo de dureza Vickers.

Ensayo de dureza Rockwell.

4.1.1 Ensayo de dureza Brinell

Es el más antiguo, comenzó a usarse en el año 1900.

Se caracteriza porque usa una bola de acero templado de 10mm de diámetro como penetrador al que se aplica una carga de 3.000kg durante un tiempo determinado.

La dureza Brinell viene dada por la siguiente expresión:

$HB = P \text{ (kg)} / S \text{ (mm}^2\text{)}$ es decir es la relación entre la carga aplicada y la huella que deja el penetrador.

El método Brinell se utiliza para determinar la dureza en materiales blandos, tales como aceros al carbono o aleaciones de aluminio.

La norma UNE-EN 10003 indica que se utilizará bola de acero para materiales de dureza Brinell superior a 450; si el material analizado es más duro puede utilizarse como penetrador una bola de un material más duro (carburo de wolframio) siempre que la dureza sea inferior a 650.

4.1.2 Ensayo de dureza Vickers

Este método surge como consecuencia de la limitación del ensayo Brinell para materiales duros.

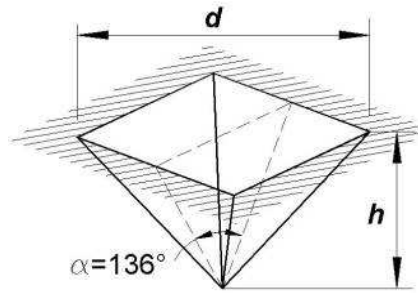
En este caso se utiliza una pirámide cuadrada de diamante como penetrador.

La utilización de una pirámide de diamante tiene las siguientes ventajas:

La huella resulta bien perfilada, cómoda para la medición; la forma de las improntas es geoméricamente semejante, por lo cual la dureza para un mismo material es constante, independientemente del valor de la carga; la dureza coincide con la dureza Brinell para los materiales de dureza media; es un método aplicable para materiales blandos y duros y sobre todo para ensayos de probetas delgadas.

La dureza Vickers se calcula con la siguiente expresión:

$$HV = P \text{ (kg)} / d^2 \text{ (mm}^2\text{)}$$



Penetrador de diamante del ensayo Vickers.

4.1.3 Ensayo de dureza Rockwell

La principal ventaja de este ensayo es que permite la lectura directa en el durómetro, lo cual ahorra tiempo (factor determinante en la industria).

En este ensayo no se mide la superficie de la huella si no la profundidad de la misma.

La carga se aplica dos veces, una primera aplicación llamada precarga y una aplicación posterior.

Existen distintos tipos de ensayo de dureza Rockwell:

-Ensayo de dureza Rockwell C:

Utiliza como penetrador un cono de diamante de ángulo 120°, una precarga de 10kg y una carga de 140kg. Se usa para ensayar materiales duros.

-Ensayo de dureza Rockwell B:

El penetrador en este caso es una bola de acero templado de 1,50mm de diámetro y la carga aplicada es de 100kg (10kg en precarga más 90kg de carga).

Se aplica en materiales menos duros.

4.2 ENSAYO DE MICRODUREZA

El ensayo de microdureza es un tipo de ensayo no destructivo.

Se aplica en el campo de los metales, cristales iónicos, cerámicas y recientemente en polímeros.

Este ensayo consiste en generar una huella muy pequeña para medir la dureza de muestras de pequeño tamaño.

Los ensayos de microdureza son ensayos de precisión que aplican cargas muy pequeñas que oscilan entre 1 y 1000 gr. Es por ello que la huella dejada es del orden de micras por lo que se utiliza un equipo llamado microdurómetro que actúa tanto como durómetro para la aplicación de la carga, como microscopio metalográfico para la observación de la misma.

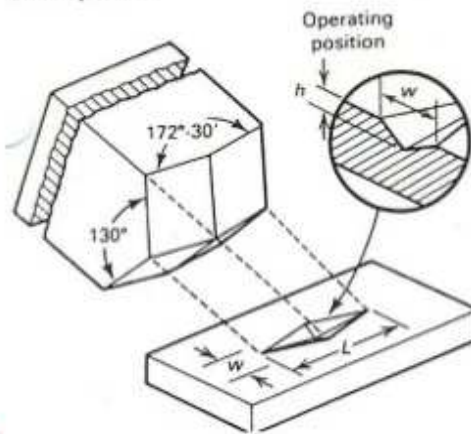
El principal inconveniente es que necesitan una gran preparación superficial del material a ensayar llegando al pulido metalográfico también denominado acabado espejo o especular.

Existen diferentes tipos de ensayo de microdureza:

MICRODUREZA

MICRODUREZA KNOOP

Fig. 2 Pyramidal Knoop indenter and resulting indentation in the workpiece



- Como penetrador utiliza una punta de diamante con base rómbica. Sus diagonales guardan una relación 7:1 y la profundidad es de sólo 1/30 de la diagonal mayor.
- Sus ángulos entre aristas son $\alpha = 130^\circ$ y $\beta = 172^\circ 30'$.

Microdureza Knoop.

$$HK = P / C L \times L$$

HK es la dureza Knoop.

P es la carga aplicada en kgf.

C es una constante de valor 0,07028.

El resultado se presenta de la siguiente forma: 1240 HV 0,5 / 30 dónde:

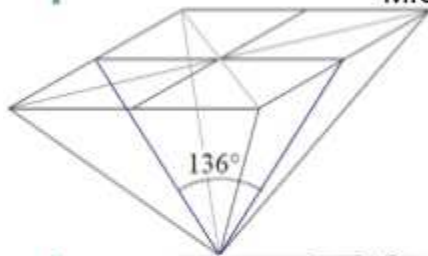
1240 es el valor de la dureza.

0,5 es la carga aplicada (kgf).

30 es el tiempo de aplicación de la carga (s).

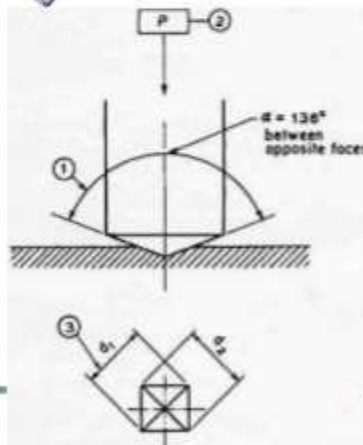
MICRODUREZA

MICRODUREZA VICKERS



$$HV = \frac{P(\text{aplicada})}{A(\text{huella})} = \frac{P}{\frac{d^2}{2 \sin(\alpha/2)}} = \frac{2P \sin \alpha/2}{d^2}$$

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$



Donde :

HV = Número de dureza de Vickers.

P = carga Aplicada (kgf o N)

d = Diagonal promedio de la huella (mm)

α = Angulo entre caras del indente (136°)

Microdureza Vickers.

El resultado se expresa de la siguiente forma 230 HV 500 / 10 dónde:

230 es el valor de la microdureza.

500 es el valor de la carga aplicada (g).

10 es el tiempo de aplicación de la carga en segundos.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre los diferentes ensayos:

TABLA 6-5 Comparación de ensayos de dureza típicos

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Tabla comparativa de ensayos de dureza.

4.3 METALOGRAFÍA

A mitades del S/ XIX, H. C. Serby inicia el estudio de las estructuras microscópicas de diferentes muescas de hierro y acero.

Hoy en día, la metalografía es una herramienta indispensable para el estudio de la microestructura de metales y aleaciones así como para el control y verificación de procesos y tratamientos metalúrgicos.

La metalografía se encarga de examinar las superficies de metales y aleaciones, su principal aplicación es conocer la naturaleza y distribución de los constituyentes de las aleaciones, es decir estudiar los microconstituyentes, su tamaño de grano y distribución.

Además la metalografía puede suministrar información sobre:

Grado de homogeneidad del material.

Presencia de inclusiones como sulfuros, óxidos, silicatos...

Defectos como poros, fisuras, grietas...

Espesores de recubrimientos.

Presencia de corrosión intergranular.

Espesores de superficies endurecidas como por ejemplo espesores de capas cementadas, templadas...

Acritud, examinando la deformación de los granos producido por el trabajo en frío.

Penetración del temple.

Estudio de soldaduras.

Orientación de las fibras.

Estudio de piezas prehistóricas.

La técnica para llegar a la observación de la pieza incluye diferentes fases:

El corte. Se realiza mediante cortadora metalográfica que consta de un disco abrasivo de corte y un elemento refrigerante. Los discos de corte están formados por partículas de materiales muy duros, abrasivos unidos por medio de un ligante o aglutinante.

Existen distintas clases de discos según el material a cortar:

Abrasivo / Aglutinante:

Alúmina-Baquelita
Si C-Baquelita
Diamante- Baquelita

Diamante-Metal
minerales

Material a cortar:

Metales férreos
Metales no férreos
Materiales duros, dúctiles y
carburos
Materiales duros, frágiles y

El empastillado sólo es necesario en el caso de que las muestras sean muy pequeñas (alambres, tornillos, piezas de pequeños diámetros...).

Consiste en proteger la muesca con algún tipo de resina termoplástica o termoestable. Se lleva a cabo por compresión en caliente o por montaje en frío.

Para realizar el empastillado en caliente se utilizan unas prensas adecuadas donde se regula la temperatura de calentamiento y refrigeración.

El montaje en frío consiste en colocar la muestra en un molde, normalmente de plástico y verter sobre ella la resina de montaje.

El desbaste o esmerilado tiene como finalidad preparar la superficie para el pulido. Después del corte, la superficie a inspeccionar presenta una cierta ondulación, con el desbaste se logra una superficie totalmente plana.

Para realizar esta operación la muestra empastillada pasa por diferentes lijas que contienen partículas abrasivas de carburo de silicio o de óxido de aluminio.

El pulido tiene como objetivo eliminar las rayas que permanecen al final del desbaste.

Se trata de dejar la superficie de la muestra brillante o especular.

El proceso es similar al desbaste, se usa el mismo equipo pero en este caso se coloca un paño húmedo al cual se le añade una suspensión de alúmina en agua o de diamante en polvo.

Ataque. El objetivo de este paso es que la microestructura del material o aleación quede manifestada.

En el caso de que el material estudiado tenga dos o más fases se buscan reactivos selectivos que ataquen una de las fases. De esta forma la fase que reacciona aparece oscura mientras la otra permanece clara.

Existen diferentes reactivos para cada material o aleación:

- El nital es una solución de ácido nítrico en alcohol etílico. Se usa en aceros al carbono y fundiciones. Distingue la perlita de la ferrita.
- El picrato sódico es una solución de ácido pícrico, sosa y agua. Diferencia la perlita de la cementita.
- Agua regia: es una solución de ácido nítrico, ácido clorhídrico y glicerina. Se usa en aceros al cromo, al níquel-cromo y austeníticos.
- Agua oxigenada amoniaca: es una solución de hidróxido amónico utilizada en aleaciones de cobre.

-El siguiente y último paso es la observación a simple vista o a través de un microscopio metalográfico, óptico o electrónico. Se estudiarán características tales como el tamaño de grano, distribución de los granos, deformación de los mismos, microestructura, inclusiones...

Existen distintos tipos de microscopios:

- El microscopio metalográfico o microscopio óptico utiliza lentes ópticas. Este tipo de microscopio permite aumentar la imagen hasta unas 2.000 veces (dependiendo de la calidad del instrumento).

Anton Van Leeuwenhoek (Países Bajos, 1632-1723) trabajó con un microscopio de una sola lente. Fue la primera persona en observar los glóbulos rojos, los espermatozoides, los protozoarios y las bacterias.

El microscopio metalográfico o microscopio óptico es de uso común para el control de calidad y producción en los procesos industriales. Con él, es posible realizar mediciones en los componentes mecánicos y electrónicos. Además permite efectuar control de superficies y el análisis óptico de los metales.

De acuerdo al propósito de uso, existen multitud de variedades dependiendo del tipo de objetivos, oculares, aumento máximo permitido, enfoque, etc.

Su funcionamiento está basado en la reflexión de un haz de luz horizontal que proviene de la fuente, dicha reflexión se produce, por medio de un reflector de vidrio plano, hacia abajo, a través del objetivo del microscopio sobre la superficie de la muestra. Parte de esta luz incidente, reflejada desde la superficie de la muestra, se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, llegará al objetivo y continuará hacia arriba a través del reflector de vidrio plano; después, de nuevo se amplificará en el sistema superior de lentes (ocular).



Microscopio metalográfico.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

-El microscopio electrónico basa su funcionamiento en utilizar electrones para iluminar un objeto. Esto se consigue gracias a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de la luz y permite ver estructuras mucho más pequeñas.

Cuenta con varios elementos: un cañón que expulsa los electrones para que choquen con el objeto en concreto y así crear una imagen aumentada y lentes magnéticas que crean campos para dirigir a los electrones.

Como característica cabe destacar que se ha de producir un vacío casi total en el interior para evitar el desplazamiento de los electrones a causa del aire.

Finalmente, todos los microscopios de estas características cuentan con un sistema que registra o guarda las imágenes creadas por los electrones.

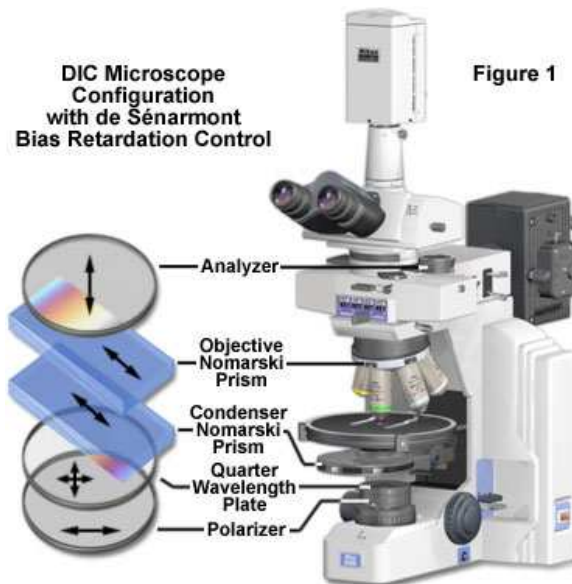


Microscopio electrónico.

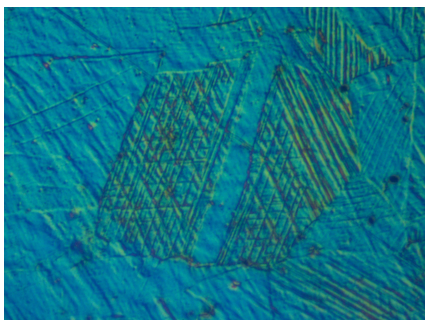
Análisis de aceros inoxidables austeníticos

La óptica Nomarski u Óptica de Contraste Interdiferencial es una técnica de microscopía de luz que emplea filtros polarizantes y prismas para producir imágenes tridimensionales.

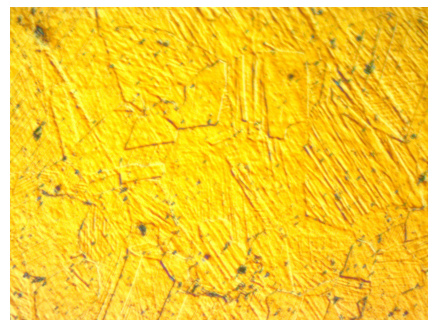
Este tipo de microscopía se caracteriza por su buena resolución y contraste que ayudan a discernir tanto detalles superficiales como estructuras internas. Además, el uso de prismas permite obtener imágenes de colores brillantes sin necesidad de preparación de muestras.



Microscopio con prisma Nomarski incorporado.



*Acero inoxidable 316TT (x500)
Nomarski.*

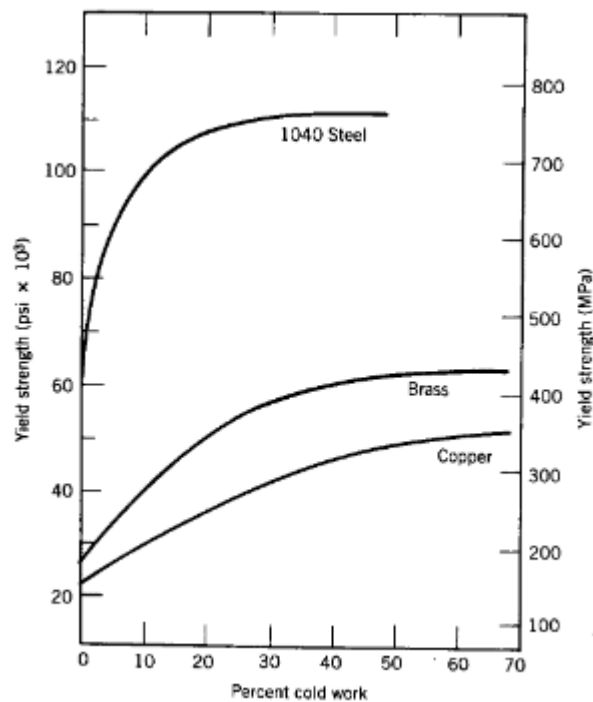


*Acero inoxidable 316TT (x200)
Nomarski.*

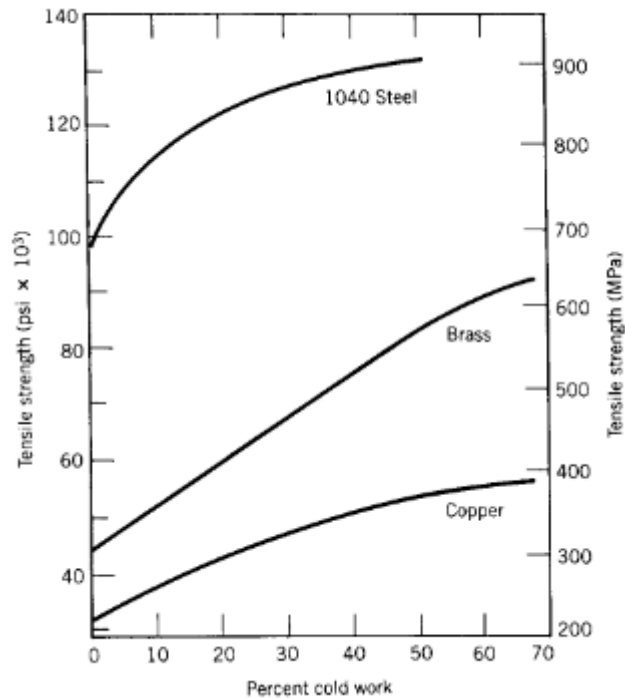
5 MECANISMOS DE AUMENTO DE RESISTENCIA

5.1 ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN EN FRÍO

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por el cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida que es deformado plásticamente. Generalmente a este fenómeno se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría” en relación a la temperatura de fusión absoluta del metal.



Variación de la resistencia a la fluencia en función del trabajo en frío.



Variación de la resistencia a la tensión en función del trabajo en frío.

El porcentaje de trabajo en frío se define de la siguiente manera:

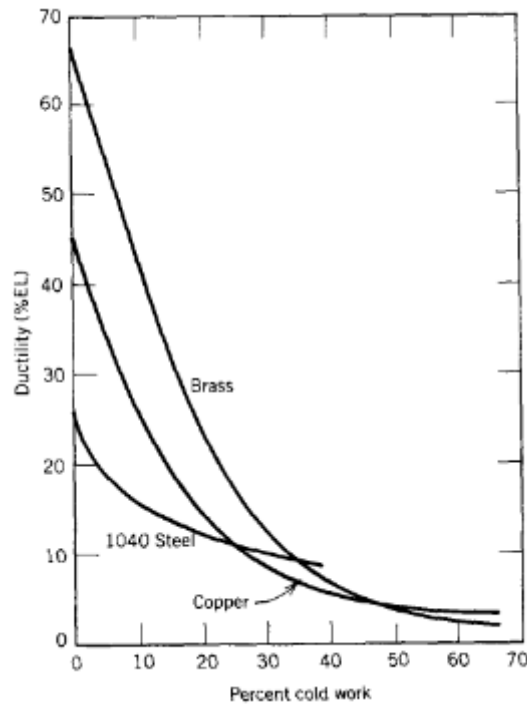
$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_d}{A_0} \times 100$$

Donde:

A₀ es el área transversal del material antes de la deformación.

A_d es el área transversal del material después de ser deformado.

Como se puede observar la resistencia del material aumenta al aumentar el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad del material disminuye tal como se muestra en el siguiente gráfico.



Ductilidad en función del trabajo en frío.

El fenómeno de endurecimiento por deformación se explica así:

1. El metal posee dislocaciones en su estructura cristalina.
2. Cuando se aplica una fuerza sobre el material, las dislocaciones se desplazan causando la deformación plástica.
3. Al moverse las dislocaciones, aumentan en número.
4. Al haber más dislocaciones en la estructura del metal, se estorban entre sí, haciéndose más difícil su movimiento.
5. Al ser más difícil que las dislocaciones se muevan, se requiere una fuerza mayor para mantenerlas en movimiento. Se dice entonces que el material se ha endurecido.

Este fenómeno se refleja en la curva esfuerzo-deformación unitaria del material. Un material perfectamente plástico tiene una zona plástica horizontal, tal como se ilustra a continuación:

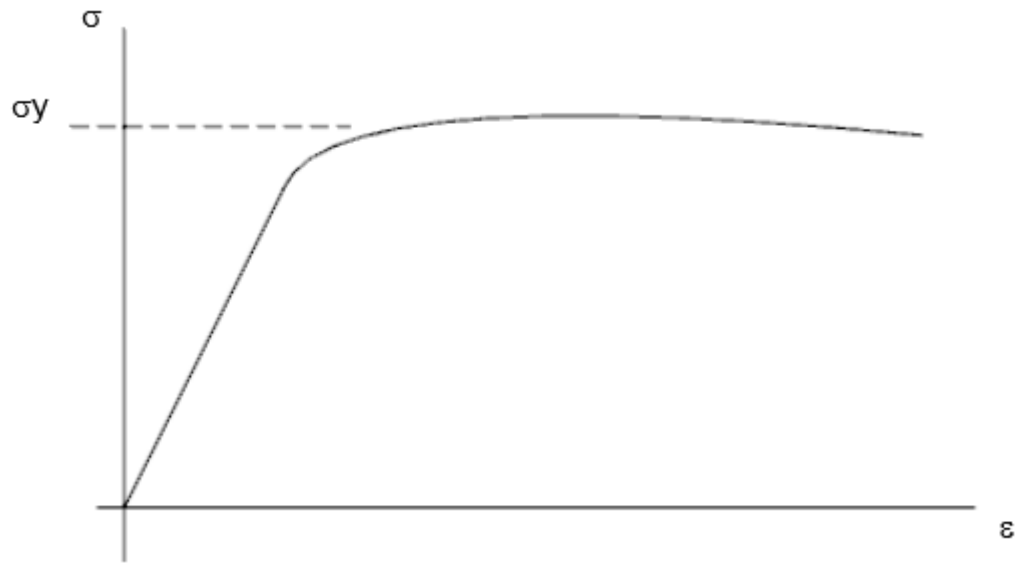
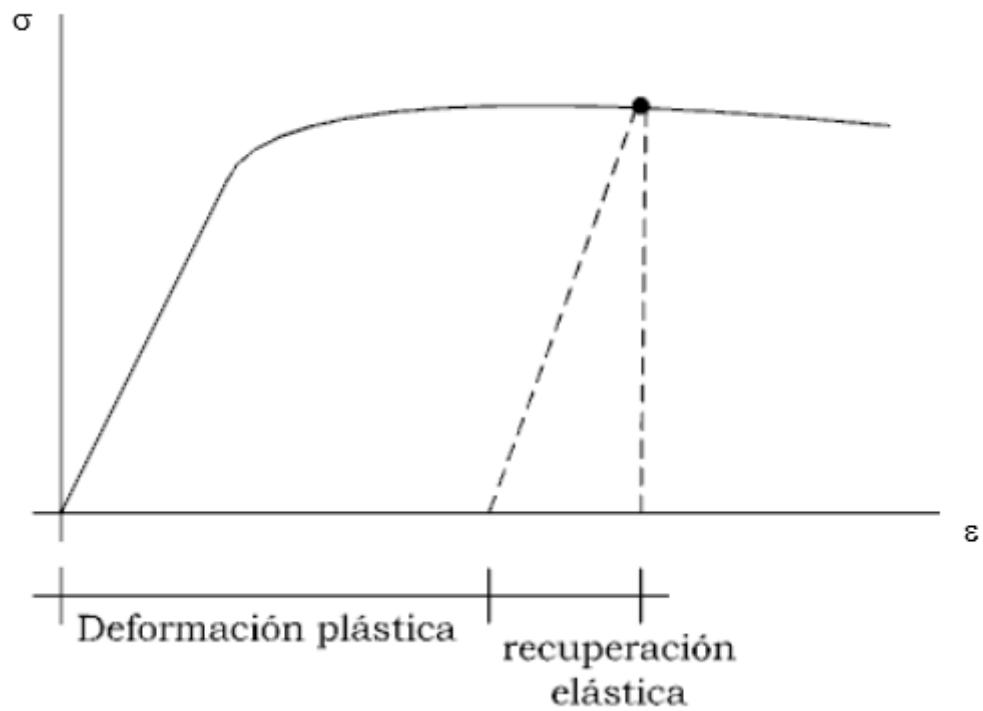


Diagrama esfuerzo-deformación para un material ideal.

En este material teórico, la deformación plástica se da a esfuerzo constante, tal como se ilustra.



Sin embargo, en los metales reales la curva tiene la siguiente forma:

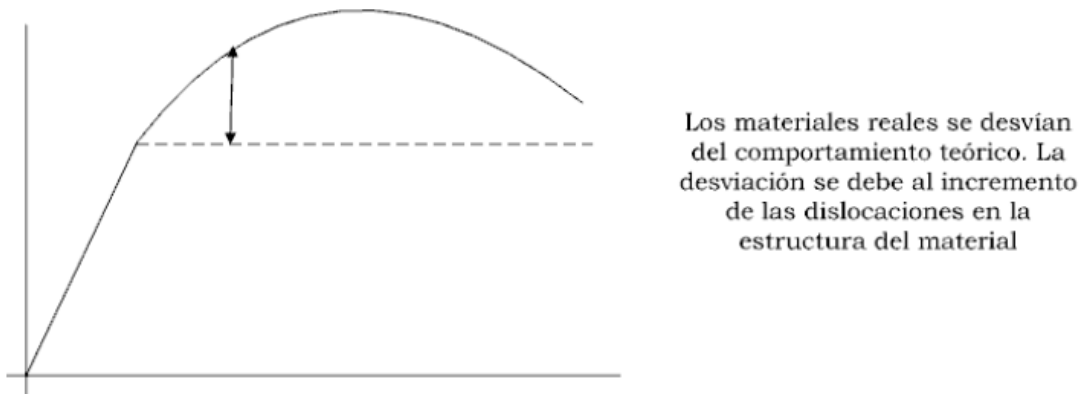
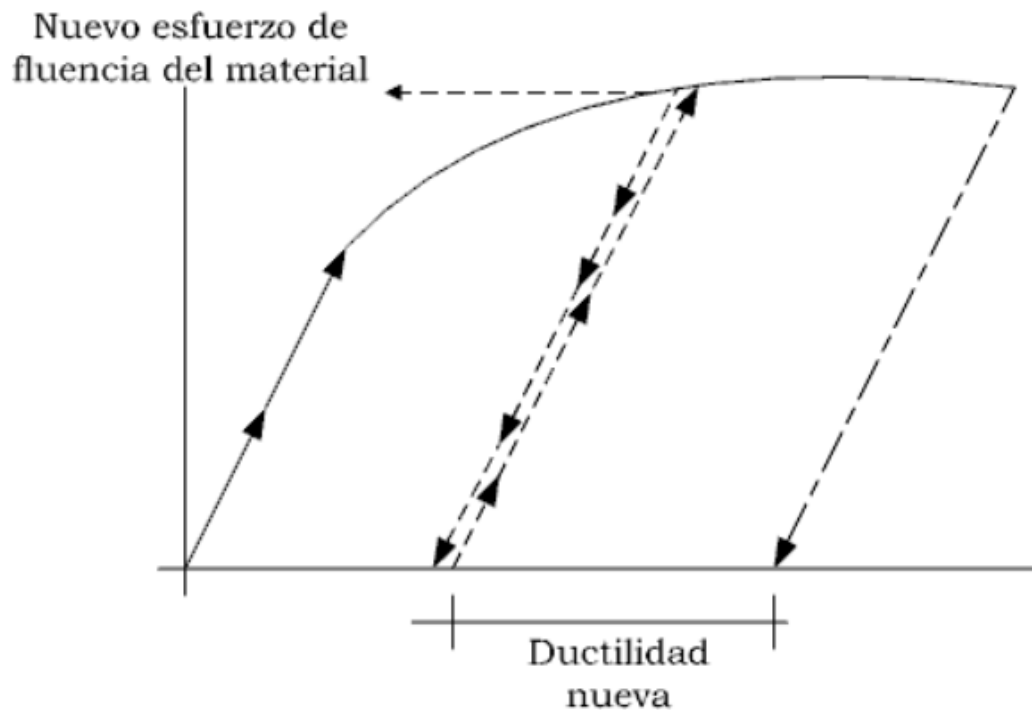
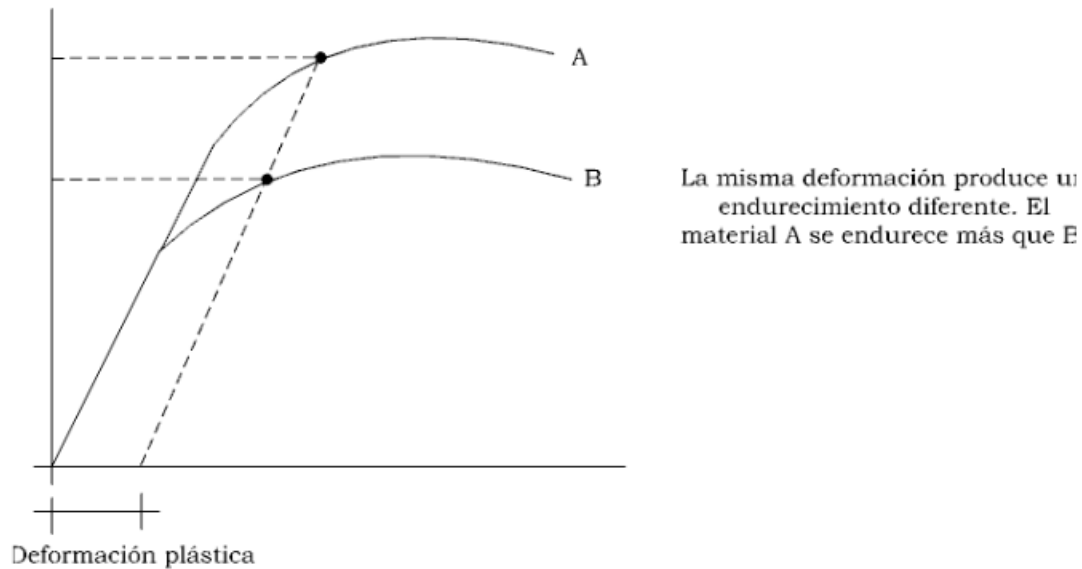


Diagrama esfuerzo – deformación para un material real.

El endurecimiento por deformación se refleja en la curva del metal de la siguiente forma:



Distintos metales tienen diferente capacidad para endurecerse cuando se deforman plásticamente. Esa habilidad de endurecerse se mide con el coeficiente de endurecimiento por deformación (n). Cuanto mayor es n para un metal, más se endurece al ser deformado plásticamente.



Para que el endurecimiento del metal se mantenga, es necesario que las dislocaciones que fueron creadas durante la deformación se mantengan en la estructura del metal. La estructura cristalina del metal tiene un número “normal” de dislocaciones.

La deformación plástica ha causado que haya más dislocaciones que ese número “normal”, por lo que la estructura cristalina tenderá a hacer desaparecer las dislocaciones “extra”. Si se aumenta la temperatura del material hasta que se permita la difusión atómica, las dislocaciones “extra” desaparecerán del material, haciendo que éste recupere las propiedades mecánicas que tenía antes de ser deformado. Sabemos que la difusión se activa a una temperatura mayor que 0.4 veces la temperatura de fusión del material en grados absolutos.

El trabajo en frío no sólo causa un aumento de las dislocaciones en la estructura del metal, sino que también causa la deformación de sus granos. La combinación de los granos deformados con el aumento de dislocaciones causa esfuerzos residuales dentro del material. Los esfuerzos residuales no son más que zonas de tensión o compresión que existen dentro del material sin que sean generadas por fuerzas externas. Los esfuerzos residuales pueden causar el debilitamiento del material, haciendo que falle a esfuerzos menores a su resistencia nominal.

El aumento de las dislocaciones y la deformación de los granos de la estructura cristalina pueden causar cambios en las propiedades eléctricas y la resistencia a la corrosión del metal. Todos los cambios asociados a la deformación plástica en frío pueden ser revertidos utilizando el tratamiento térmico apropiado. La restauración de las propiedades a los valores previos a la deformación se logra a partir de dos procesos diferentes que ocurren a temperatura elevada:

La recuperación o restauración:

La etapa de restauración se realiza a temperaturas inferiores a la de recristalización. Los átomos reocupan sus posiciones de equilibrio. El principal efecto de la restauración es disminuir las tensiones internas producidas por el trabajo en frío aunque también disminuye algo la dureza y la resistencia.

Recristalización.

Aún cuando la recuperación ha sido completada, los granos de la estructura cristalina todavía se encuentran en un estado de elevada energía de deformación. La recristalización es la formación de un nuevo conjunto de granos libres de deformación con baja densidad de dislocaciones y con características similares a las que tenían antes del trabajo en frío. Los granos nuevos se forman de un núcleo pequeño y crecen hasta que reemplazan completamente a los granos deformados originales, proceso que requiere difusión de corto alcance.

Durante la recristalización, las propiedades mecánicas que fueron cambiadas como resultado del trabajo en frío son restauradas a sus valores previos a la deformación plástica, es decir, el metal se vuelve más suave, más débil y más dúctil.

La recristalización es un proceso cuya extensión depende tanto del tiempo como de la temperatura a la que son expuestos el material. El grado o fracción de recristalización aumenta con el tiempo al que el material está expuesto a la temperatura elevada. La recristalización de una aleación metálica en particular algunas veces se especifica en términos de la temperatura de recristalización, la cual se define como la temperatura a la cual el proceso de recristalización finaliza en 1 hora.

Generalmente la temperatura de recristalización se encuentra entre un tercio y la mitad de la temperatura de fusión absoluta del metal o aleación, y depende de varios factores incluidos la cantidad de trabajo en frío y la pureza de la aleación.

La recristalización ocurre más rápido en los metales puros que en las aleaciones, por lo tanto, al alear un metal se incrementa su temperatura de recristalización. Si las operaciones de deformación plástica se realizan a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización, el proceso se denomina trabajo en caliente. El material permanece relativamente suave y dúctil durante la deformación y por lo tanto pueden lograrse deformaciones plásticas grandes.

Crecimiento del grano.

Después de que la recristalización se ha completado, los granos libres de deformación continuarán creciendo si el metal se mantiene a temperatura elevada. Este fenómeno es llamado crecimiento del grano y ocurre debido a que a medida que el grano crece, disminuye el área total de las fronteras de los granos, disminuyendo por tanto la energía total almacenada en el material.

6 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS

Los tratamientos térmicos tienen como objetivo mejorar las propiedades y características de los aceros.

Según la norma EN 10052, se define tratamiento térmico como la sucesión de operaciones durante las cuales un producto férreo sólido se somete total o parcialmente a ciclos térmicos para obtener un cambio de sus propiedades, de su estructura o de ambas.

Los objetivos de un tratamiento térmico son:

- Mejorar la maquinabilidad de un material o reducir su dureza.
- Eliminar la acritud originada por el trabajo en frío.
- Eliminar tensiones internas que aumentan la fragilidad.
- Conseguir una estructura homogénea.
- Lograr máxima dureza y resistencia.
- Mejorar la resistencia a los agentes químicos.

Los factores principales que intervienen en los tratamientos térmicos son:

- La temperatura del tratamiento.
- La duración de las fases del ciclo térmico.
- La forma de enfriamiento.
- El efecto de la masa.

En ciertos tratamientos es necesario llevar el acero al estado austenítico, esto implica un calentamiento y un mantenimiento suficiente para homogeneizar la pieza.

Este proceso se denomina austenización.

A continuación se citan los tratamientos térmicos más destacados:

El recocido tiene como objetivo ablandar el acero dejándolo en las condiciones adecuadas para su transformación posterior.

Este tratamiento aumenta propiedades como el alargamiento, la estricción y la plasticidad. Por el contrario disminuye la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza.

Los factores que influyen en el recocido son:

- Temperatura de calentamiento.
- El tiempo de calentamiento, que depende del espesor.
- La velocidad de enfriamiento.

Existen diferentes tipos de enfriamiento:

- En el interior del horno.
- En baños de sales o metales fundidos.
- Al aire.

Así mismo existen diferentes tipos de recocido:

- El recocido de homogeneización.
- El recocido de regeneración.
- El recocido de globalización.
- El recocido contra acritud o recocido de recristalización.
- El recocido de estabilización.

Otro tratamiento térmico es el normalizado, se realiza en aceros al carbono que han sido procesados en caliente (forja o laminación) con el fin de regenerar su estructura cristalina y eliminar las tensiones internas. La estructura final obtenida es perlita más fina que la obtenida por recocido por lo que tiene algo más de dureza. La principal ventaja de este tratamiento es la rapidez y facilidad de ejecución.

En el temple se realiza un calentamiento hasta austenizar el metal seguido de un enfriamiento rápido para transformar la austenita en martensita. El temple aumenta propiedades tales como la resistencia a la tracción, límite elástico y dureza. Por el contrario disminuye alargamiento y estricción.

A consecuencia de los calentamientos y enfriamientos bruscos de este tratamiento pueden aparecer defectos como oxidaciones y decarburaciones, exceso de fragilidad, falta de dureza, grietas y roturas...

Existen distintos tipos de temple:

El temple escalonado martensítico o martempering

En el temple escalonado bainítico o austempering.

El ausforming.

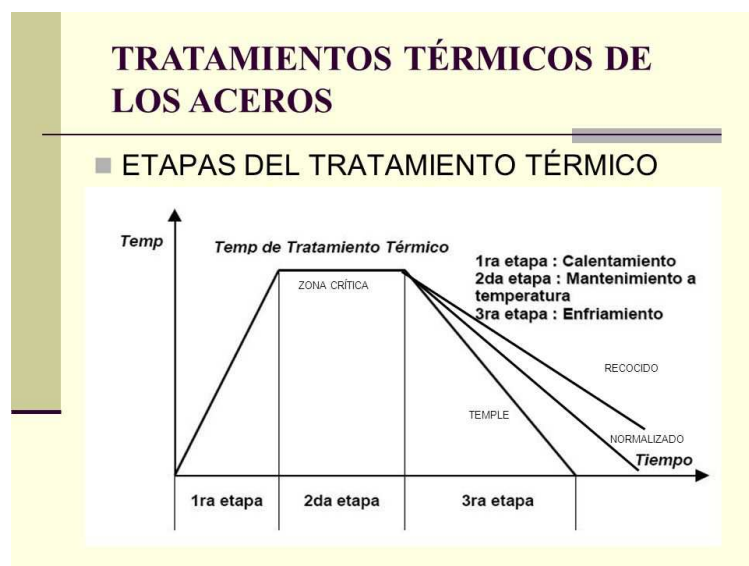


Diagrama de un tratamiento térmico.

El temple superficial es un tratamiento térmico cuyo objetivo es obtener piezas con estructuras tenaces en el núcleo y una superficie con elevada dureza, por ejemplo un engranaje o en ruedas dentadas que son piezas que están sometidas a choques y vibraciones.

El revenido es un tratamiento que se da a los aceros que han sido sometidos a un temple con el fin de eliminar tensiones y aumentar la tenacidad. En este tratamiento la pieza mejora propiedades como el alargamiento, la estricción y la densidad. Por el contrario disminuye la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza.

Las fases de este tratamiento térmico son:

Calentamiento.

Mantenimiento.

El enfriamiento se suele realizar al aire.

Los factores que intervienen en el revenido son:

Estructura inicial. Habitualmente es martensita que tiende a descomponerse en ferrita y cementita.

Temperatura y tiempo de calentamiento.

Velocidad de enfriamiento.

Dimensiones de la pieza.



Rueda dentada sometida a temple superficial.

6.1 RECOCIDO EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS

Los aceros inoxidables austeníticos no pueden endurecerse por tratamiento térmico, pero sí por trabajo en frío, después de este tratamiento se les aplica un recocido para asegurar la máxima resistencia a la corrosión y restaurar la ductilidad. Durante el recocido, los carburos que decrecen la resistencia a la corrosión intergranular, se disuelven. Las temperaturas de recocido varían algo con la composición, como se ve en la siguiente tabla:

Tipo	Temperatura (°C)
201, 202	1010 a 1120
301, 302, 302B, 303, 303Se	1010 a 1120
304, 305, 308	1010 a 1120
309, 309S	1040 a 1120
310, 310S	1040 a 1065
314	1040 a 1120
316	1040 a 1120
317	1065 a 1120

Como la precipitación de los carburos puede ocurrir entre los 400 y 840°C, es deseable realizar el recocido sobre este límite. Además es necesario que los carburos estén disueltos antes de comenzar el enfriamiento, y como esto ocurre muy lentamente, se elige la temperatura más elevada que no aumente el tamaño de grano, cercana a los 1090°C.

El enfriamiento debe ser rápido pero consistente con las limitaciones de distorsión. El mejor temple es en agua, porque los carburos disueltos permanecen en solución; no obstante, cuando las piezas son delgadas y el temple en agua produce distorsión, será necesario enfriar en aire forzado. Si en este caso llegan a precipitarse carburos, la solución será utilizar acero inoxidable estabilizado (principalmente los tipos 321, 347 y 348).

6.2 TRATAMIENTO TÉRMICO REALIZADO

Se han estudiado ocho probetas de las cuales cuatro no han sido sometidas a tratamiento térmico alguno y las otras cuatro han sido sometidas a un tratamiento de recocido contra acritud estando una hora en el horno a 850° C y dejándolas enfriar posteriormente dentro del mismo.

Las probetas corresponden a los siguientes tipos de aceros inoxidables austeníticos:

Serie AISI 303
Serie AISI 304
Serie AISI 310
Serie AISI 316

7 **ACEROS ESTUDIADOS**

7.1 SERIE AISI 303

Composición química (%):

%	303
C	0,15 máx
Mn	2.0
Si	1.0
P	0.20
S	0.15 min
Cr	17-19
Ni	8-10

Presenta las siguientes propiedades mecánicas (valores mínimos en MPa a 20° C):

Grado	303
Resistencia a la tracción	500
Prueba de estrés 0,2% (MPa)	190
Alargamiento A5 (%)	35
Dureza Rockwell B	262 max

Propiedades físicas:

Propiedad	Valor
Densidad	8,03 g / cm ³
Punto de fusión	1455 ° C
Módulo de elasticidad	193 GPa
Resistividad eléctrica	0.072x10 ⁻⁶ Ω.m
Conductividad térmica	16.3 W / mK a 100 ° C
Expansión Térmica	17.3x10 ⁻⁶ / K a 100 ° C

Denominaciones y especificaciones:

Euronorma	UNS	BS	En	Grado
1.4305	S30300	303S31	58M	303

Resistencia a la corrosión:

Sufre corrosión por picado (pitting) al alearlo con azufre. Por esta razón la serie 303 tiene menos resistencia a la corrosión que la 304. Sin embargo la mantiene en ambientes a moderada temperatura.

En entornos que contienen cloruros a más de 60 ° C, la serie 303 está expuesta a la corrosión por picaduras y grietas.

No es adecuado para su uso en entornos marinos.

En cuanto a la resistencia a la oxidación a altas temperaturas, la serie 303 presenta buen comportamiento hasta 760° C llegando incluso a temperaturas de servicio de hasta 870° C. Sin embargo no se recomienda ya que son sensibles a la precipitación de carburos entre 425 y 860° C.

Se recomienda la fabricación de este tipo de aceros sólo con herramientas destinadas a aceros inoxidables. Las superficies de trabajo deben estar perfectamente limpias antes de su uso (precauciones necesarias para evitar la contaminación del producto a fabricar).

La serie AISI 303 no es adecuada para aplicaciones solicitadas a trabajos a bajas temperaturas.

No pueden ser endurecidos por tratamiento térmico, únicamente se pueden tratar calentándolos hasta 1010-1120° C y enfriándolos después rápidamente.

Presentan un buen grado de maquinabilidad que puede ser mejorada siguiendo estas recomendaciones:

Las superficies de corte hay que mantenerlas afiladas, ya que sin filo causan exceso de resistencia para el maquinado.

Los cortes deben ser lo suficientemente profundos para evitar el endurecimiento de la superficie del material.

Es necesario el uso de rompe virutas así como refrigerantes y lubricantes que eviten altas temperaturas durante el proceso de maquinado.

La adición de azufre provoca que la serie AISI 303 no tenga buen grado de soldabilidad. Aún así, si tiene que ser soldada, se recomienda el uso de electrodos de relleno 308L y 309.

Con el fin de obtener máxima resistencia a la corrosión, los cordones de soldadura deben ser templados.

Las aplicaciones más comunes donde se encuentran este tipo de aceros son:

Conectores.

Cerraduras.

Tuercas.

Tornillos.

Cremalleras.

Partes de bombas.



Serie AISI 303. Tornillos y tuercas.

7.2 SERIE AISI 304

Esta serie representa a los comúnmente llamados aceros inoxidable todo propósito ya que tiene propiedades adecuadas en muy diversas aplicaciones.

Se recomienda su uso en construcciones ligeras soldadas (dónde el recocido no es posible o práctico) pero que requieren buena resistencia a la corrosión.

Este tipo de acero inoxidable tiene bajos contenidos en carbono (hasta 0,08%), lo cual evita la precipitación de carburos cuando se expone a periodos prolongados a alta temperatura. Como consecuencia de ello presenta buenas propiedades mecánicas a altas temperaturas hasta los 800-900° C.

Composición química:

%	304	304L	304H
C	0,08 máx	0,03 máx	0,10 máx
Mn	2.0	2.0	2.0
Si	0.75	0.75	0.75
P	0.045	0.045	0.045
S	0.03	0.03	0.03
Cr	18-20	18-20	18-20
Ni	10.5	12	10.5
N	0,1	0,1	-

Análisis de aceros inoxidable austeníticos

Propiedades mecánicas:

Grado	304	304L	304H
Resistencia a la tracción	520	500	520
Compresión (MPa)	210	210	210
Prueba de estrés 0,2% (MPa)	210	200	210
Alargamiento A5 (%)	45	45	45
Dureza Rockwell B	92	92	92

Propiedades físicas:

Propiedad	Valor
Densidad	8,00 g / cm ³
Punto de fusión	1400- 1450 ° C
Módulo de elasticidad	193 GPa
Resistividad eléctrica	0.072x10 ⁻⁶ Ω.m
Conductividad térmica	16.2 W / mK a 100 ° C
Expansión Térmica	17.2x10 ⁻⁶ / K a 100 ° C

Denominaciones y especificaciones:

Euronorma	UNS	BS	En	Grado
1.4301	S30400	304S15 304S16 304S31	58E	304
1.4306	S30403	304S11		304L
1.4307	-	304S11		304L
1.4311	-	304S11		304L
1.4948	S30409	304S51		304H

La serie AISI 304 tiene una excelente resistencia a la corrosión en una amplia variedad de entornos y cuando está en contacto con diferentes medios corrosivos.

Las picaduras y corrosión pueden ocurrir en entornos que contienen cloruros.

La corrosión bajo tensión puede ocurrir a temperaturas superiores a 60° C.

Los aceros 304 tienen buena resistencia a la oxidación en condiciones de servicio intermitente hasta los 870° C y en servicio continuo a 925° C.

Sin embargo, el uso continuado a 425-860° C no se recomienda si se requiere resistencia a la corrosión en agua. En este caso se recomienda el acero 304L debido a su resistencia a la precipitación de carburos.

Cuando se requiere alta resistencia a temperaturas superiores a 500° C y hasta 800° C, se recomienda el acero 304H.

Los métodos de fabricación que implican el trabajo en frío pueden requerir una etapa de recocido intermedio para aliviar el endurecimiento por deformación, evitar que se rompa y la formación de grietas. Al finalizar el proceso de fabricación se recomienda tratar el acero con un recocido para reducir tensiones internas.

Los métodos de fabricación que implican el trabajo en caliente, como la forja, deben llevarse a cabo después de un calentamiento uniforme a 1149-1260° C. Los componentes fabricados deben entonces ser enfriados rápidamente para garantizar la máxima resistencia a la corrosión.

La serie 304 tiene buena maquinabilidad. El mecanizado puede mejorarse con las siguientes recomendaciones:

- Cuchillas afiladas.

- Los cortes deben ser lo suficientemente profundos para evitar el endurecimiento de la superficie del material.

- Uso de rompe virutas refrigerantes y lubricantes.

Las aplicaciones más comunes de esta serie son:

- Equipos para procesamiento de alimentos, enfriadores de leche...

- Intercambiadores de calor.

- Contenedores de productos químicos.

- Tanques de almacenamiento de vino y cerveza.

- Partes de extintores de fuego.



Tanques para el almacenamiento de cerveza.



Extintores fabricados con aceros serie AISI 304 entre otros materiales.

7.3 SERIE AISI 310

Las aleaciones 310 se utilizan para aplicaciones a temperaturas elevadas. Su alto contenido de cromo y níquel proporciona una resistencia a la corrosión comparable a la del acero 304 y una resistencia a la oxidación superior.

Composición química:

- Hasta 0,25 % de C.
- Hasta 2 % de Mn.
- Hasta 1,5 % de Si.
- Contenido en Cr entre 24 % y 26 %.
- Contenido en Ni entre 19 % y 22 %.
- Hasta un 0,045 % de P.
- Hasta un 0,03 % de Z.

Propiedades mecánicas:

- Esfuerzo de fluencia 205 MPa.
- Esfuerzo de tracción 515 Mpa.
- Elongación 40 % (en 50mm).
- Dureza Brinell 180.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

Estos aceros inoxidables de alta aleación generalmente exhiben una excelente resistencia a las temperaturas elevadas junto con una buena resistencia a la deformación por movimiento longitudinal y al ataque del medio ambiente. Por lo tanto, se usan ampliamente en la industria del tratamiento térmico para partes de hornos, tales como bandas transportadoras, rodillos, partes de quemadores, soporte para refractarios, retortas y forros de horno, abanicos, colgadores de tubos y cestos y bandejas para sostener piezas pequeñas.

Estos grados además se usan en la industria de los procesos químicos para contener ácidos concentrados calientes, amoníaco y dióxido de sulfuro.

En la industria de los alimentos procesados, se usan en contacto con ácidos acético y cítrico calientes.



Pieza de vidrio dispuesta para ser introducida en el horno.

7.4 SERIE AISI 316

Su principal característica es la resistencia a la corrosión frente a diversos agentes químicos, ácidos y atmósfera salina.

Composición química:

Hasta 0,07 % de C.

Hasta 1 % de Si.

Hasta un 2 % de Mn.

Hasta un 0,045 % de P.

Hasta un 0,015 % de Z.

Contenido en Cr entre 16,5 y 18,5 %.

Contenido en Mb entre 2 y 25 %.

Contenido en Ni entre 10 y 13%.

Propiedades mecánicas (en MPa a 20° C):

Límite de fluencia de 255 MPa.

Resistencia a la rotura de 285 Mpa.

Resistencia a la tracción de 550 MPa.

Elongación 45 % (en 50mm).

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

En relación a la resistencia a la corrosión tiene una excelente resistencia al picado, aceptable bajo altas temperaturas y no aplicable bajo tensión.

En cuanto a las características de trabajo:

Tiene un buen conformado en frío.

Excelente soldabilidad.

Sus principales aplicaciones son:

Adornos arquitectónicos.

Equipos químicos de procesos.

Equipos para el procesamiento de productos alimentarios, farmacéuticos, fotográficos, textiles...



Equipo para el procesamiento de fármacos.

A continuación se muestran unas tablas comparativas entre la serie AISI 310 y 316.

Propiedades físicas:

Tipo AISI			316 / 316 L	310
Densidad		(Kg/dm ³)	7,95	7,9
Módulo de elasticidad		(N/mm ²)	193.000	200.000
Calor específico a 20°C		(J/Kg°K)	500	500
Conductividad térmica	(W/m °K)	A 100°C	16	12,5
		A 500°C	21	17,5
Coeficiente medio de expansión térmica	(x 10 ⁻⁶ /°C)	0 / 100°C	16,02	15,20
		0 / 300°C	16,20	16,60
		0 / 500°C	17,46	17,60
		0 / 700°C	18,54	18,50
Intervalo de fusión		(°C)	1371-1398	1398/1454

Propiedades eléctricas:

Tipo AISI		304 / 304 L	316 / 316 L	310
Permeabilidad magnética recocido		Paramagnético 1,008	Paramagnético 1,008	Paramagnético 1,008
Resistividad eléctrica a 20°C	(? x m)	0,72	0,74	0,80

Valores de dureza a 20° C.

Tipo AISI			316 / 316 L	310
Dureza Brinell	Recocido	HB	130-185 / 120-170	145/210
	Trab. En frío	HB		
Dureza Rockwell	Recocido	HRB	70-85	70/85
	Trab. En frío	HRC		

Análisis de aceros inoxidables austeníticos

Propiedades mecánicas a elevadas temperaturas:

Tipo AISI			316 / 316 L	310
Límite elástico 0,2%, mínimo	Rp (N/mm ²)	A 300°C	140 / 138	165
		A 400°C	125 / 115	156
		A 500°C	105 / 95	147
Límite de fluencia (N/mm ²)		A 550°C	82 / 71	
		A 600°C	62 / 53	58,5
		A 700°C	20 / 15,5	19,5
		A 800°C	6,5 / 5	5

Propiedades térmicas:

Tipo AISI			316 / 316 L	310
Recocido			enfriado rápido desde 1008-1120	enfriado rápido desde 1036/1149
Temple		(°C)	no templable	no templable
Forja	Comienzo	(°C)	1200	1176
	Finalización	(°C)	925	980
Temperatura máx. de operación	Serv. continuo	(°C)	840	1120
	Serv. intermitente	(°C)	925	1040

Otras propiedades:

Tipo AISI	316 / 316 L	310
Soldabilidad	muy buena	buena
Maquinado	bueno	bueno
Embutibilidad	buena	buena

8 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

8.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PASOS REALIZADOS EN LA PARTE EXPERIMENTAL

En primer lugar se empastillan las muestras con una resina termoplástica por compresión en caliente.



Empastillado de muestras.

El siguiente paso consiste en desbastar las muestras con lija de mayor a menor rugosidad (C400, C600, C800 y C1200) con el fin de preparar las probetas para el pulido.



Lijas de diferente rugosidad.

Análisis de aceros inoxidable austeníticos

A continuación se pulen con paño de terciopelo y una suspensión de alúmina en agua dejando una superficie especular.



Pulido con paño aterciopelado y suspensión de alúmina.

Después se lavan las muestras con agua y alcohol y se secan.

El último paso antes del ensayo con el microdurómetro es atacar las probetas con agua regia.

Las muestras ya están listas para ser ensayadas en el microdurómetro. Éste actúa como durómetro para la aplicación de la carga y también como microscopio metalográfico con el fin de poder observar la huella y medir la longitud de las diagonales.

Las condiciones en el ensayo de microdureza Vickers son las siguientes:

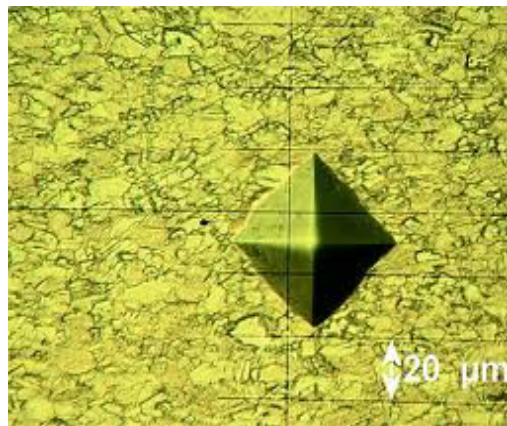
P = 500g.

T = 15 seg.

Número de repeticiones = 4 / muestra.



Microdurómetro.

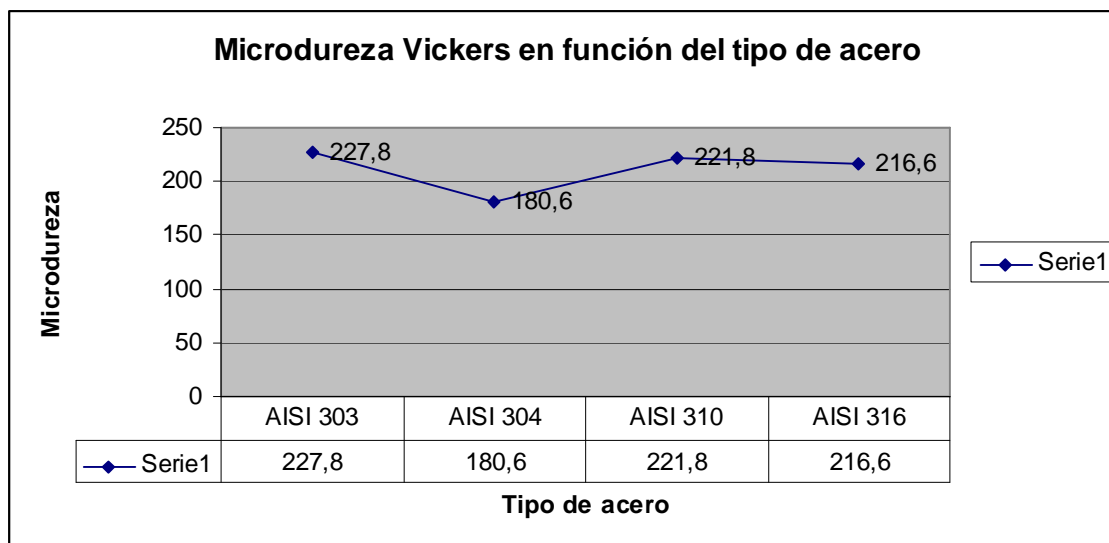


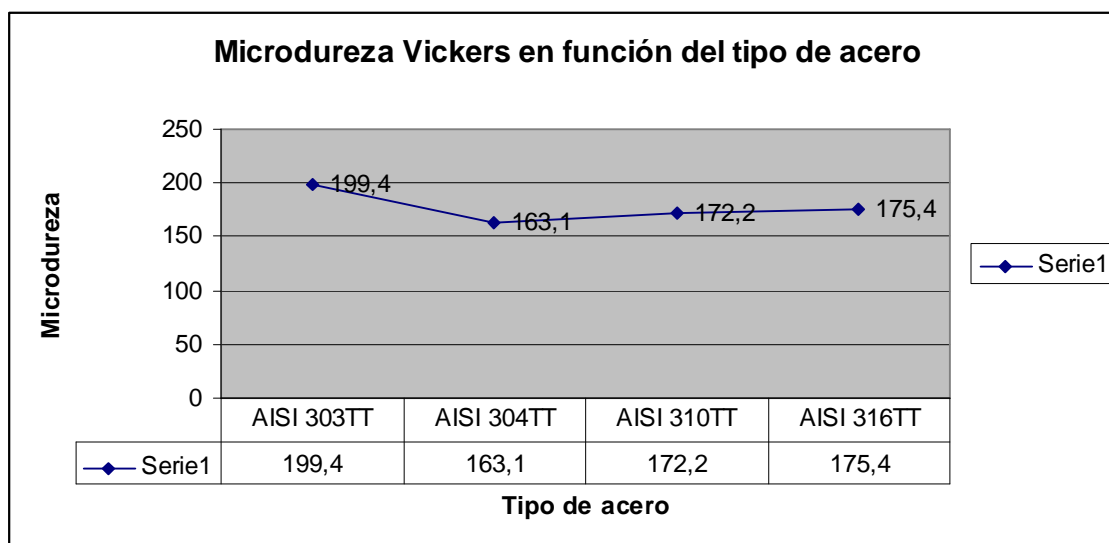
Huella dejada por el microdurómetro.

8.2 MICRODUREZA

A continuación se muestran los resultados de microdureza Vickers obtenidos en el laboratorio.

ACERO	1ª medida (kgf/mm2)	2ª medida (kgf/mm2)	3ª medida (kgf/mm2)	4ª medida (kgf/mm2)	Media (kgf/mm2)
AISI 303	219,3	223,5	236,5	231,9	227,8
AISI 303TT	189,7	197	202,5	208,4	199,4
AISI 304	185,4	181,1	176,8	179,1	180,6
AISI 304TT	172,1	163,7	159	157,6	163,1
AISI 310	224,6	211,8	236,6	214,1	221,8
AISI 310TT	170	173,7	173,5	171,6	172,2
AISI 316	218,2	222,1	221	199,9	216,6
AISI 316TT	174,7	178,3	171,8	176,6	175,4



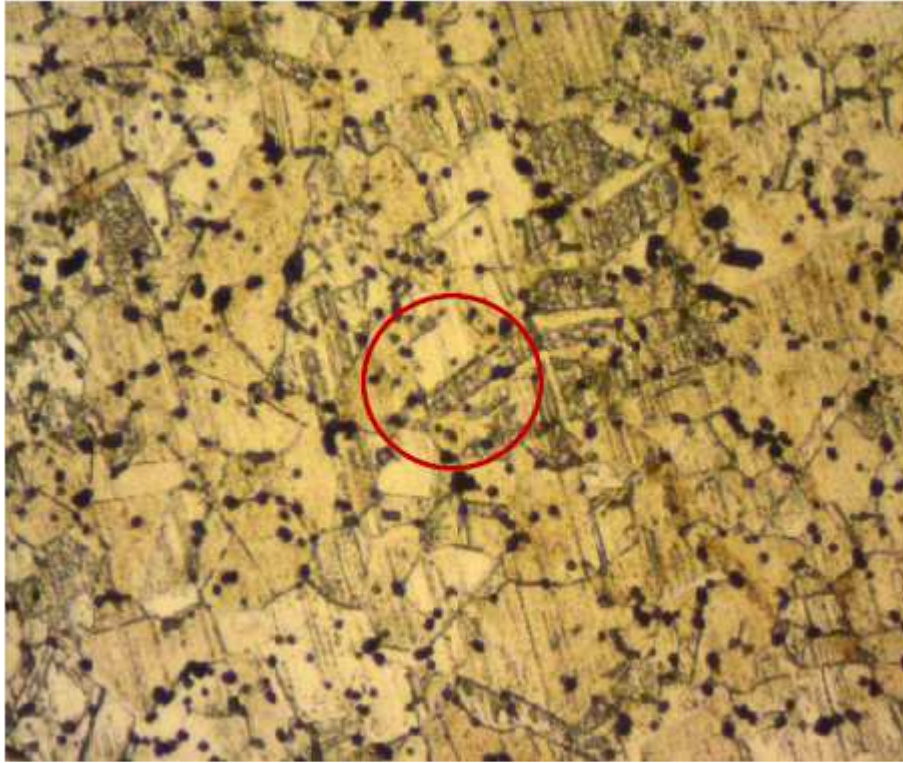


Observando los resultados obtenidos en el ensayo de microdureza Vickers se aprecia que la dureza de todas las probetas disminuye al ser sometidas al recocido contra acritud. Esto es una consecuencia directa del cambio en la microestructura debida al tratamiento térmico. Los granos de austenita aumentan su tamaño y el número de dislocaciones se reduce, mejorando así los valores de ductilidad y estricción y reduciendo por el contrario los valores de dureza y resistencia.

8.3 METALOGRAFÍA

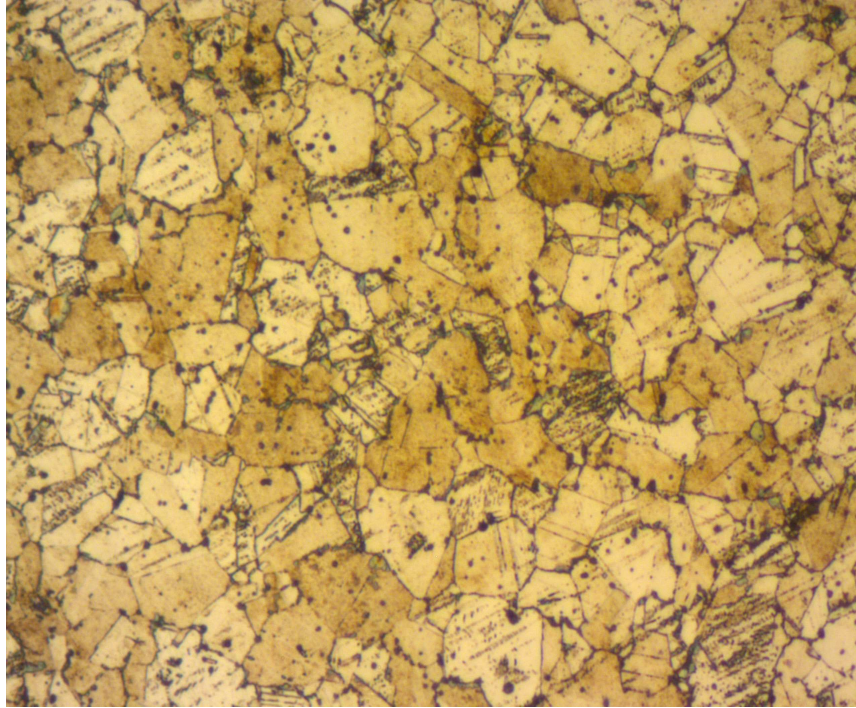
En todos los casos se ha atacado las muestras con agua regia, solución de ácido nítrico (10cm³), ácido clorhídrico (25cm³) y glicerina (25cm³).

SERIE AISI 303

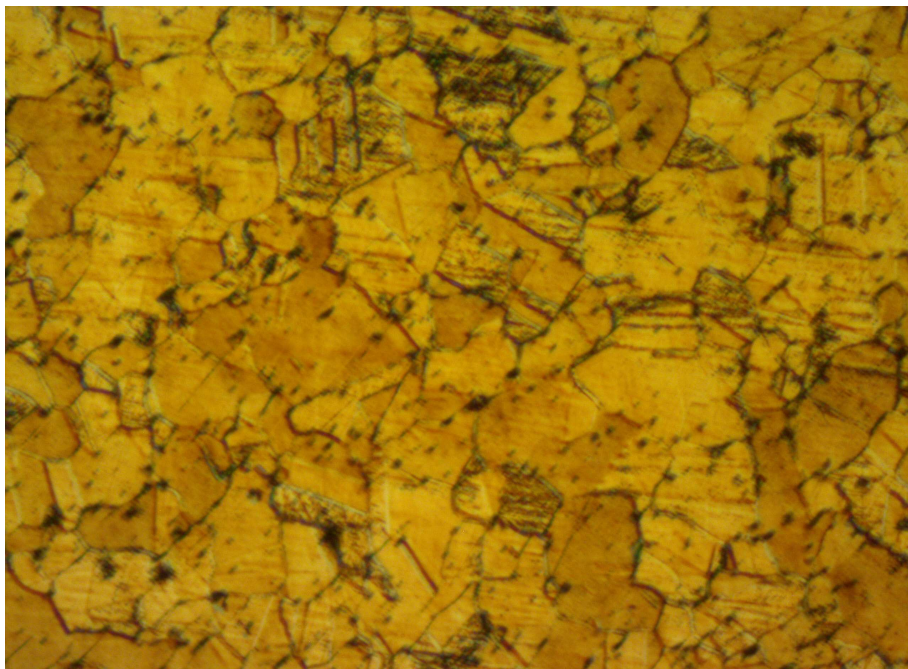


AISI 303 (x200). En la micrografía aparecen grandes granos de austenita, en algunos granos es posible apreciar maclas.

Análisis de aceros inoxidables austeníticos



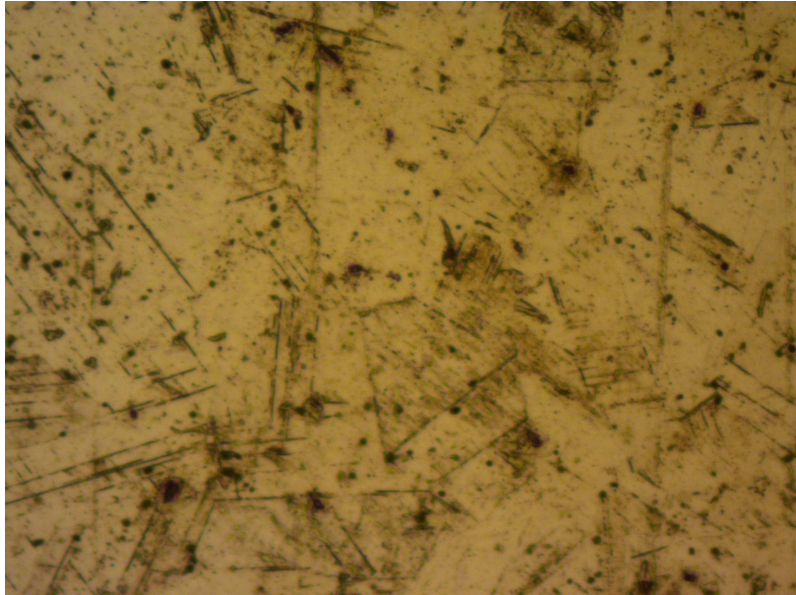
AISI 303TT (x200)



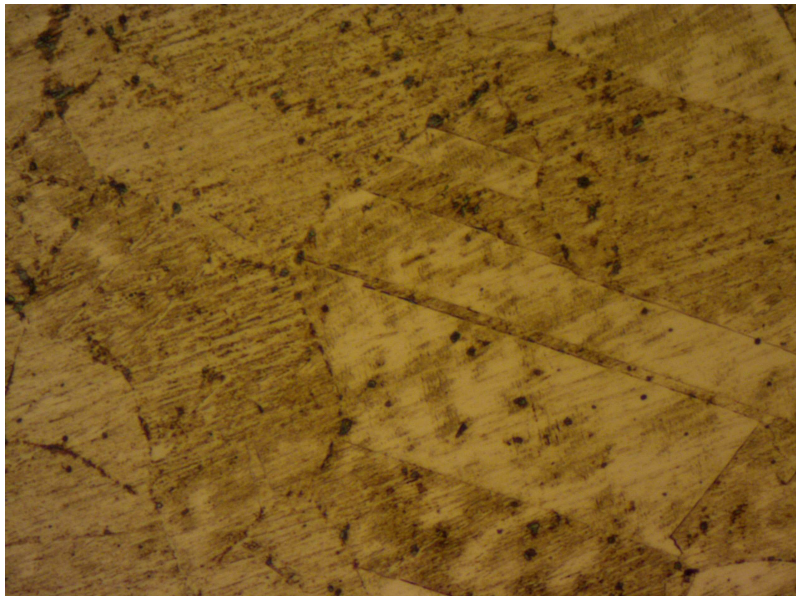
AISI 303TT (x200) Nomarski.

Fotos realizadas con el microscopio óptico dónde se observa cómo aumenta el tamaño de grano así como una disminución en el número de dislocaciones lo cual repercute directamente en que los valores de dureza y resistencia sean menores.

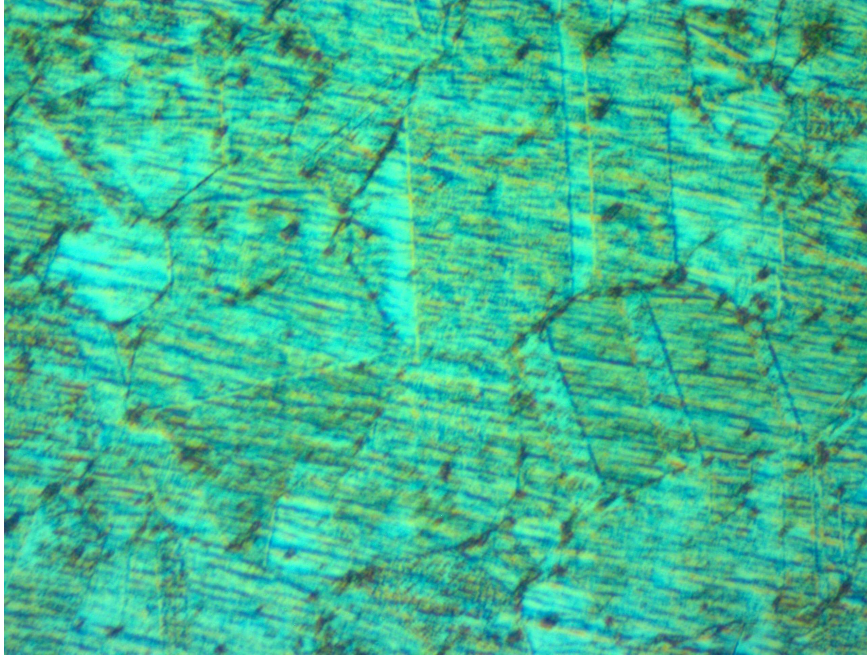
SERIE AISI 304



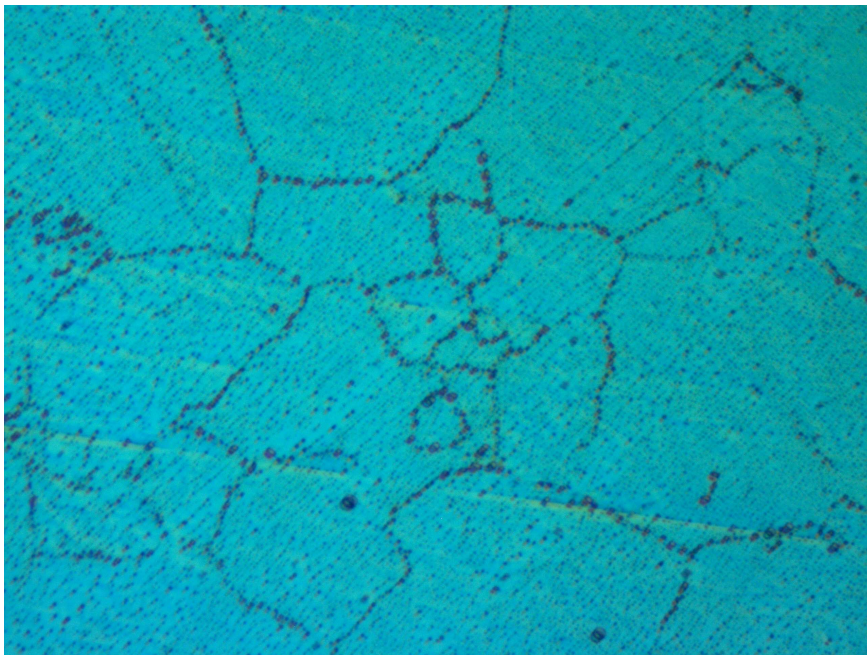
AISI 304 (x200)



AISI 304TT (x200)



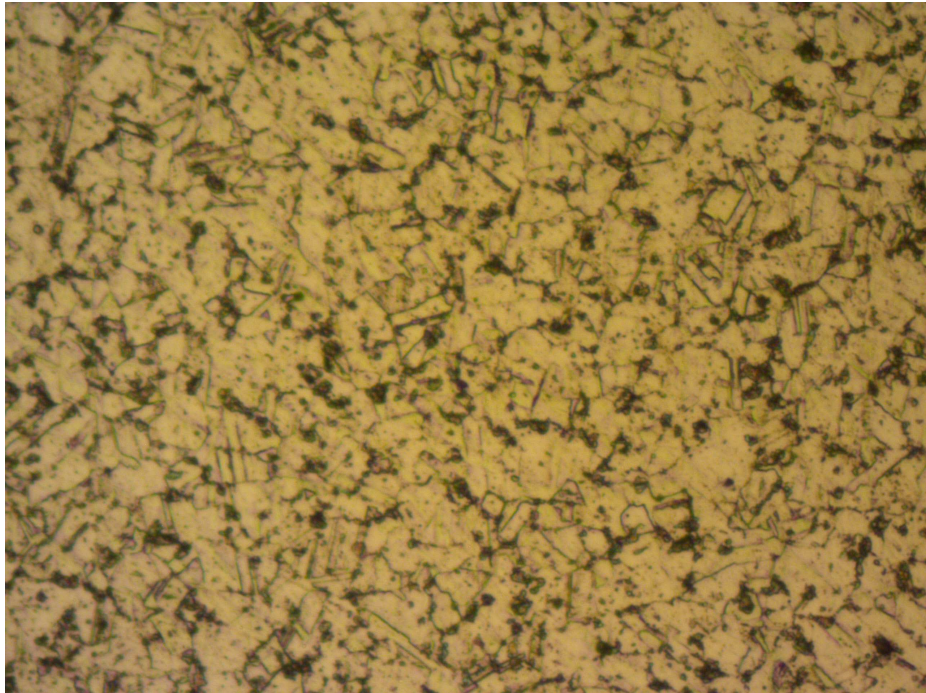
AISI 304TT (x200) Nomarski



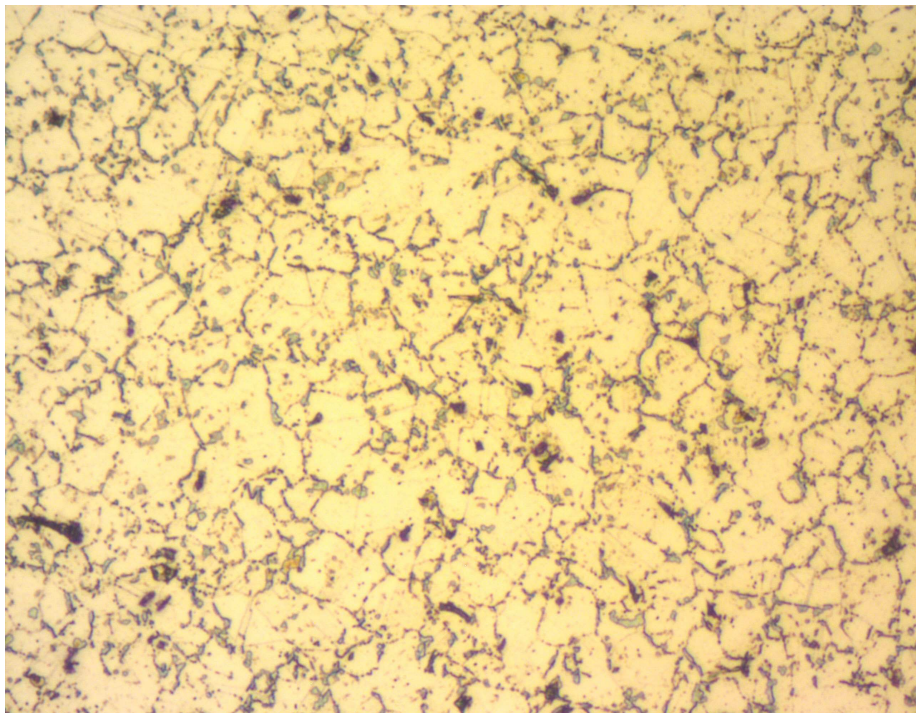
AISI 304TT (x200) Nomarski

En estas micrografías se puede observar un tamaño de grano más grueso.
También aparecen pequeños puntos en los bordes de grano lo cual es un signo del comienzo de la corrosión intergranular.

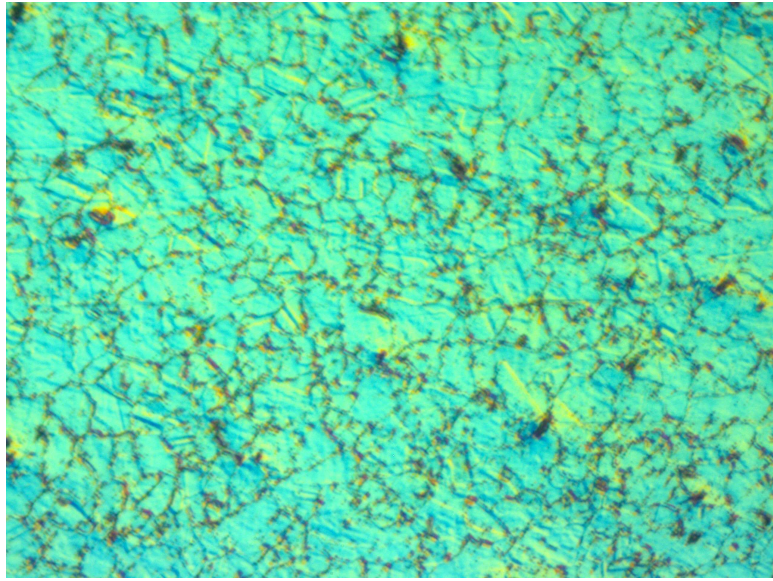
SERIE AISI 310



AISI 310 (x200)



AISI 310TT (x200)



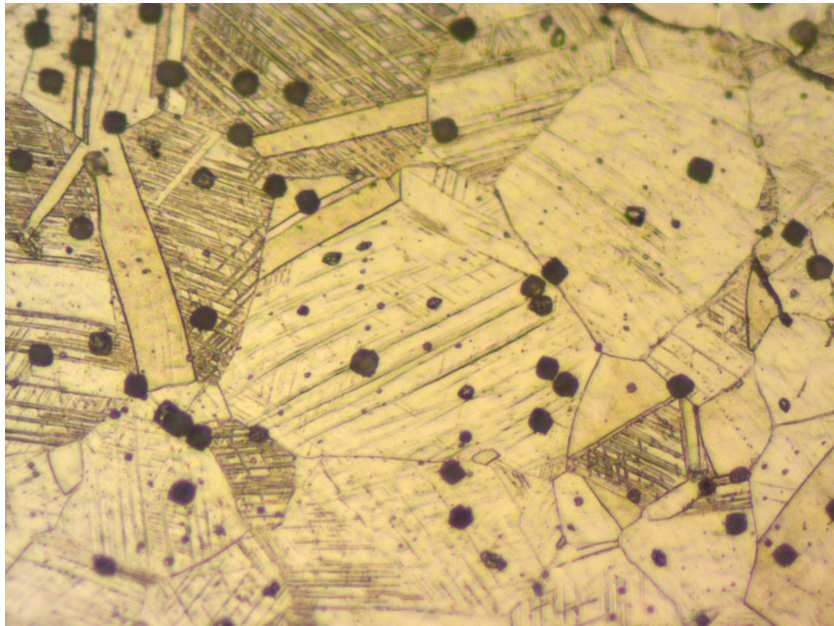
AISI 310TT (x200) Nomarski



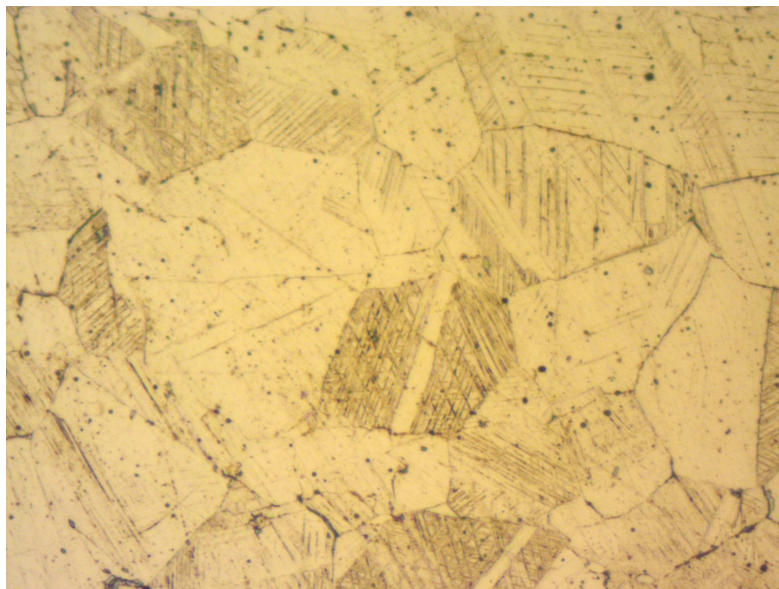
AISI 310TT (x200) Nomarski

En las micrografías de la serie AISI 310 se ve cómo el recocido contra acritud aumenta el tamaño de grano y disminuye el número de dislocaciones, lo cual se traduce en valores inferiores de dureza.

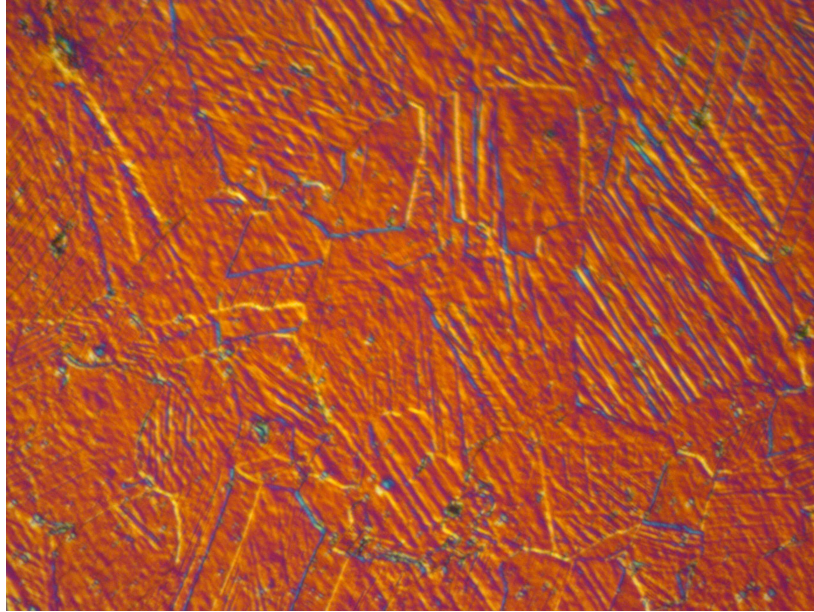
SERIE AISI 316



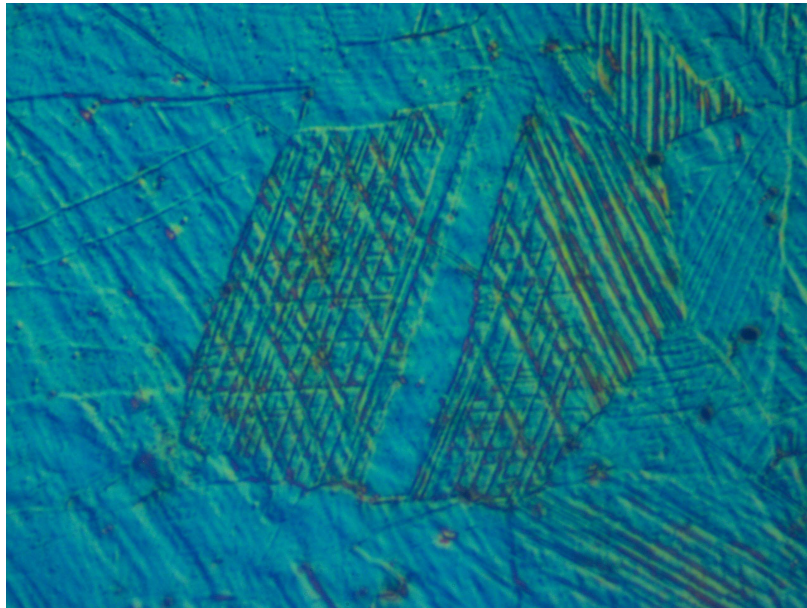
AISI 316 (x200). En la micrografía se observan los granos austeníticos.



AISI 316TT (x200).



AISI 316TT (x200) Nomarski



AISI 316TT (x500)Nomarski. Detalle de un grano, obtenido con la lente Nomarski, dónde se aprecia la estructura de la macla. Con la óptica Nomarski se consigue cierta profundidad de campo y es posible distinguir mejor las líneas de macla.

9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Como se puede observar en las tablas, los valores de dureza de todas las probetas ensayadas disminuyen después de ser sometidas al tratamiento térmico de recocido contra acritud.

La serie que más dureza presenta es la AISI 303, con un valor de 227,8 kgf/mm² antes del ser tratada térmicamente; y un valor de 199,4 kgf/mm² después del tratamiento.

Por el contrario la serie que menos dureza tiene es la AISI 304 con un valor de 180,6 kgf/mm² previa al recocido, dato que se reduce hasta los 163,1 kgf/mm² después del tratamiento térmico.

Las series AISI 310 y 316 presentan valores de dureza muy similares: 221,8 kgf/mm² y 216,6 kgf/mm² respectivamente. Una vez sometidas al recocido estos valores disminuyen hasta los 172,2 kgf/mm² para la serie AISI 310 y 175,4 kgf/mm² en el caso de la serie AISI 316.

Estos datos numéricos corroboran la información aportada por el ensayo metalográfico donde se observa cómo el recocido contra acritud transforma el material otorgándole mayor estabilidad y provocando un aumento en el tamaño de grano así como una disminución en el número de maclas. Todo esto se traduce en valores mayores de ductilidad y alargamiento y menores de dureza y resistencia.

10 CONCLUSIONES

Tras el ensayo metalográfico y de microdureza de los diferentes aceros inoxidable austeníticos ensayados se concluye que la microestructura, es decir, el tamaño de grano, la distribución de los mismos y la composición de las fases, tienen una relación directa con las características mecánicas del material.

Como se ha podido comprobar, la dureza de todas las probetas disminuye al ser sometidas al tratamiento térmico y esto es consecuencia directa del aumento del tamaño de grano y un menor número de maclas.

En nuestro ensayo, observamos como el recocido contra acritud es un tratamiento térmico que transforma la microestructura de las muestras y esto repercute directamente en una menor dureza, mayor resistencia a la corrosión y mayor ductilidad y alargamiento.

Por todo ello, los tratamientos térmicos son procedimientos habituales usados en la industria con el fin de mejorar y adaptar las características de los materiales a las solicitudes requeridas por las aplicaciones a las cuales son destinados.

11 **BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN**

“Ingeniería de materiales para industria y construcción”

Autor: J. M. Sanjosé, M^a Antonieta Madre Sediles, J. M. Franco Gimeno.
Editorial Mira Editores.

“Ciencia de materiales”

Autor: José María Las Heras Esteban.
Editorial Donostiarra. Año Julio 1991.

“Materiales industriales”

Autor: José María Las Heras Esteban.
Editorial Cedel. Año 1981.

“Introducción a la metalurgia física”

Autor: Sydney Avner.
Editorial Mcgraw- Hill. Año 1988.

Páginas web consultadas:

<http://www.wikipedia.com>

<http://www.urbipedia.com>

<http://www.scribd.com>

<http://www.estudiyensayo.files.wordpress.com>

<http://www.buleria.unileon.es>

<http://www.sandvik.coromant.com>

<http://www.bonnet.es>

<http://www.outokumpu.com>

<http://www.trecem.com>

<http://www.aceroslevinson.com>

<http://www.materialesfull.wikispaces.com>

<http://www.arquitecturaenacero.org>

Páginas web consultadas:

<http://www.industriaalimenticia.com>

<http://www.cordes.com>

<http://www.slideshare.net>

<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>

http://www.firro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia